



TITLE:

森林生態系での植物養分物質の循環 : そこでの雨水のはたす役割りに
ついて(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

岩坪, 五郎

CITATION:

岩坪, 五郎. 森林生態系での植物養分物質の循環 : そこでの雨水のはたす役割りについて. 京都大学, 1975, 農学博士

ISSUE DATE:

1975-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r2803>

RIGHT:

農

201

1-0

森林生態系での植物養分物質の循環

—— そこでの雨水のはたす役割りについて ——

1974・12

岩 坪 五 郎

目

次

はじめに	1
実験の方法と場所	2
林外雨と林内雨・樹幹流の量的関係	4
林外雨・林内雨・樹幹流にふくまれる養分物質の濃度・量 ...	10
1 養分物質の濃度	10
2 養分物質の量	12
3 林外雨と林内雨の養分量の相違	14
1) クローネによるエアロゾルの吸着について...	14
2) 溶脱について	16
3) 植物体による吸収口について	17
地表流・地中流にふくまれる養分物質の濃度	19
溪流にふくまれる養分物質の濃度・量	23
1 量水堰堤	23
2 流出水量	23
3 流出水の濃度変化	25
4 流出水にふくまれる養分量	26
雨水にふくまれる養分物質の濃度・量の森林での垂直的変化...	28
1 養分濃度の垂直的変化	29
2 養分量の垂直的変化	31
リターにふくまれる養分物質の濃度・量.....	33
森林の養分現存量と生長量	38
森林生態系での養分物質の循環	42
文 献	47

森林生態系での植物養分物質の循環

——そこでの雨水のはたす役割りについて——

岩 坪 五 郎

はじめに

森林を、森林生態系というみかたでとらえる。その動態・ありようを定量的に把握しようとするのが、この研究の目的である。

森林生態系内部とは、森林を構成する植物・動物、土壌表面をおおう落葉落枝、植物の根圏を形成する土壌と、そのなかにふくまれる生物・無生物、有機物・無機物である。森林生態系外部とは、垂直的には大気圏と母岩であり、水平的には、その森林の占有面積以外の場である。

森林生態系外から系内へ、いろいろの物質がはいってくる。その一部は植物に吸収され、植物体の一部となり、やがて落葉・落枝・倒木となり、分解されて、また吸収される。また、溪流に溶けて、系外に流出するものや、直接、大気中に放出されるものもある。生態系の収入・支出、系内での循環、このような物質の動きを、森林生態系の物質循環という。

動植物の主要な構成物質である炭素は、緑色植物の炭酸同化作用で、直接、系外からとりいれられ、呼吸作用で直接、系外に放出される。したがって、炭素の物質循環は開放系といわれる。チッ素については、土壌のなかの共生ないし遊離のチッ素固定菌や根瘤バクテリアによる空中チッ素の固定、土壌からの脱チツ作用などによる出入がある。しかし、量的には、いちどとりいれられたチッ素の植物による吸収、枯死脱落にともなう土壌への還元・分解・吸収といったサイクルが、主流をしめるので、半開放系といわれる。これにたいしてミネラル類の収入源は、母岩の風化によるものしかなく、その流入速度・量は、炭素・チッ素にくらべて、ずっとおそく、ちいさく、また土壌の吸着作用により系外への流出もすくないので、閉鎖系といわれてきている。

しかし、INGHAM [1950] MADGWICK ら [1959] NYE [1961] らは、雨水に

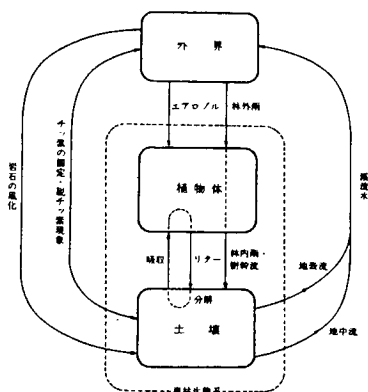


図1 養分物質の循環経路

養分物質の循環系において、どのような位置をしめているかを、実験的に考察するため、林外の雨水、系外への流出水、林内雨水、リター・フール、植物による吸収量、地表流、地中流、植物体・土壌の現存量などを測定し、養分元素の分析をおこなった。

この研究をするについて京都大学農学部四手井綱英教授、堤利夫助教授から指導と批判をいただいた。林業試験所丸山明雄氏、日綿実業KK西田八州男氏、故正垣幸三氏らは共同研究者であった。京都大学農学部森林生態学研究室、京都大学上賀茂試験地のかたがたにいろいろお世話になった。あつく御礼申しあげる。

実験の方法と場所

養分物質の森林生態系での循環の経路を、図式化したものが図1である。このばあい、養分物質としてチッ素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムを考える。

森林生態系にとって養分の収入は、雨水にふくまれる養分量、クローネが吸着するエアロゾル、バクテリアによるチッ素の固定、岩石の風化による土壌のミネラル類の増加がある。

このうち、雨水にふくまれる養分量は、林外においた雨樋で集水した。エアロゾルによる収入は、ステンレス・スチールの網をのちいた実験で、存在の

表 1 森林生態系における養分物質の現存量、循環の経路と測定手段

現 存 量	植 物 体 土 壌	伐 採・定 量 Ao 層と 70 cm まで採取・定量	
収 入	林外雨	雨樋にて採水、定量	
	エアロゾル チッ素の固定 岩石の風化	模型実験にて可能性のみ立証、量・不明 不明 不明	
内部での循環	植物体→土壌 "	林内雨+樹幹流 リター・フォール	採水・定量、ただしエアロゾル分の分離不能 採取・定量、ただし根の枯死量は不明
	土壌→植物体 リターの分解	植物体の伐採、樹幹析解・相対生長式より算出 不明	
支 出	(地表流)*	カメの甲型ライシメーターで採水・定量	
	(地中流)* 渓流水 脱チッ素現象	地中に雨樋を埋め採水、濃度のみ測定 量水堰堤で採水定量 不明	

*地表流・地中流は渓流水として合流する。

可能性は立証できたが、森林生態系にとっての収入量は測定できていない。バクテリアによるチッ素の固定、岩石の風化による収入は測定していない。

森林生態系にとっての支出は、地表流・地中流そして渓流水として流出する水にふくまれる養分量と、脱チッ素現象といわれる土壌からのチッ素の離脱である。

地表流は、カメノコ型の合成樹脂製の枠で、測定分析した。地中流は、地中 10cm に樋を埋めて採水したが、単位面積あたりの養分量はもとめられなかった。流出水は、下流にある量水堰堤で採水し、その養分濃度に流量を乗じて、流出養分量をもとめた。

森林生態系内での循環の経路は、植物体から土壌へ還元される経路、雨水によって養分物質がクローネから溶脱される経路、土壌にふくまれる養分物質が植物体に吸収される経路、リターフォールが土壌微生物によって分解される経路がある。植物体から土壌への経路については、一カ年間リタートラップを林床において測定した。ただし、根の枯死量は不明である。雨水によりクローネから溶脱される経路は、林内に雨樋をおいて林内雨を、樹幹に合成樹脂のカラーをまきつけて、樹幹流を測定した。土壌から植物体への経路は、1968年、実験の最終段階に、試験木をすべて根から抜きとり、樹幹析解と樹木の各部分の相対生長関係から、1年間の生長量を推定し、それに養分濃度を乗じて、算出

した。リターの分解の経路については、考察していない。これら各経路の測定方法を一括したものが、表1である。

実験をおこなったのは、おもに京都大学農学部演習林上賀茂試験地の広葉樹林とヒノキ林である。

広葉樹林は、常緑樹と落葉樹のいりまじった、いわゆる二次広葉樹林で、ソヨゴがおおく、他にクリ、リョウブ、コナラ、ツバキ、クロバイなどがある。1968年当時、上木の平均胸高直径7.6cm、平均樹高6.8m、立木密度6,200本/haで、クローネは閉鎖していた。なお、この広葉樹林を水源とする量水堰堤が、下方にある。

ヒノキ林は、50～110年生の天然生林であるが、生長はよくない。平均胸高直径10.8cm、平均樹高9.7m、立木密度2,700本/haで、クローネはだいたい閉鎖している、といったていどである。この林分は、量水堰堤の集水域ではなく、流出量は測定されていない。

分析した養分元素と、分析方法はつぎのとおりである。

チッ素：水については、硝酸態チッ素とアンモニウム態チッ素を分析した。前者はフェノールジスルホン酸法で比色、後者はネスラー試薬で比色分析した。植物体・土壌については、全チッ素をケールダール法で分析した。

リン：モリブデン青法で比色

カリウム：炎光光度法

カルシウム：ムレキサイドを指示薬とし、EDTAで滴定

マグネシウム：EBTを指示薬とし、EDTAで滴定

林外雨と林内雨・樹幹流の量的関係

雨水にふくまれる養分物質量は、雨水量に養分物質の濃度をかけて算出する。

林内の雨水量をもとめるために、林外と林内に同型の合成樹脂製の雨樋を設置した。雨樋は幅10cm、長さ3.5m、深さ10cmの角樋である。これを林外区として上賀茂試験地の気象観測用露場に2本、広葉樹林とヒノキ林には、それぞれ4本ずつ設置した。円型の雨量計でなく、細長い角樋をもちいたのは、場所によるバラツキのおおきい林内雨の平均値を、えやすくするためである。

降水量は、すくなくとも月2回測定した。その結果えられた林外雨と林内雨の量的関係は、おおくの報告にみられるように、 $y=ax-b$ によってあらわさ

れる一次の関係であった
[LEONARD 1961][KITTRE-
DGE 1948]. すなわち, ヒ
ノキ林では, $T=0.741x-$
 0.76 (T : 林内雨量, x : 林外
雨量, 単位: mm) の回帰式
をえた.

広葉樹林では, 落葉樹が
葉をつけている時季と落葉
の時季で, 林内雨量に差が
みとめられるから, 生育期
(4月~10月) と生育休止期
(11月~3月) にわけて, 回
帰式をもとめた.

$$\text{生育期: } T=0.589x \\ -0.51$$

$$\text{生育休止期: } T=0.712x \\ -1.98$$

(T : 林内雨量, x : 林外雨
量, 単位: mm)

生育期・休止期ともに,
一次の関係をえた(図2).
生育期で約6割, 休止期に
は約7割の雨水が林床にた
つことになる. その差
は, 落葉樹の落葉によっ
てもたらされたものであろう.
この林では, 常緑樹のゾ
ゴが大半をしめているので,
生育期と生育休止期の差は

1割ていどであるが, 演習林本部苗畑で, 25cm 間隔でうえた3年生のカン
ンボクの林での, 林内雨の林外雨にたいする割合は, 図3にしめすように, 8

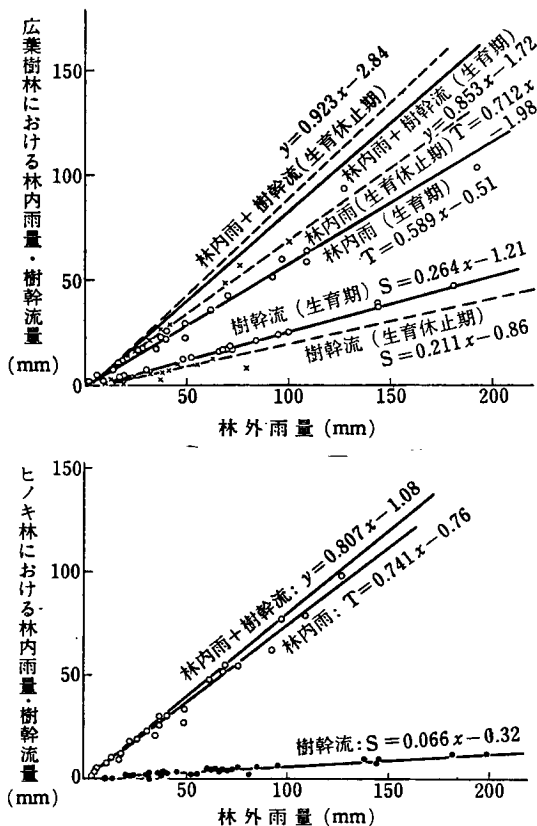


図2 林外雨量と林内雨量, 樹幹流量の関係

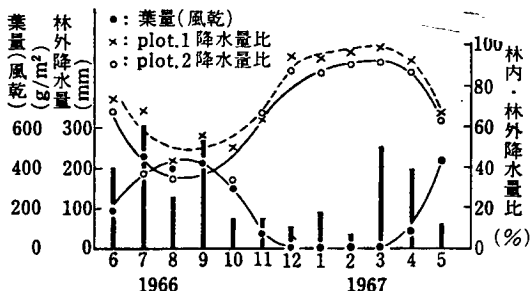


図3 林外雨量, 葉量, 林外・林内雨量比の月変化

月には3～4割、冬期には9.5～10割ちかくにおよんでいる[岩坪ら 1968].

森林にふった雨は、その大半は林内雨として林床にいたるが、他の部分は林床にいたることなく、蒸発するものと、樹幹にそって流下するものがある。林内雨と樹幹をそうもの、すなわち樹幹流の合計が、林床に到達する部分であり、それと林外雨との差が、蒸発する部分である。

樹幹流と林外雨量の関係をもとめるため、広葉樹林・ヒノキ林にそれぞれ5×5m²のプロットをとり、そのなかにふくまれるすべての立木に、合成樹脂のカラーをとりつけ、単木ごとの樹幹流量と、林外雨量との関係をもとめた。広葉樹のプロットでは、ソヨゴ11本、ツバキ1本、リョウブ2本、計14本。ヒノキ林では、ヒノキ8本であった。

ヒノキおよび常緑広葉樹のソヨゴについては、各季節をつうじて、林外

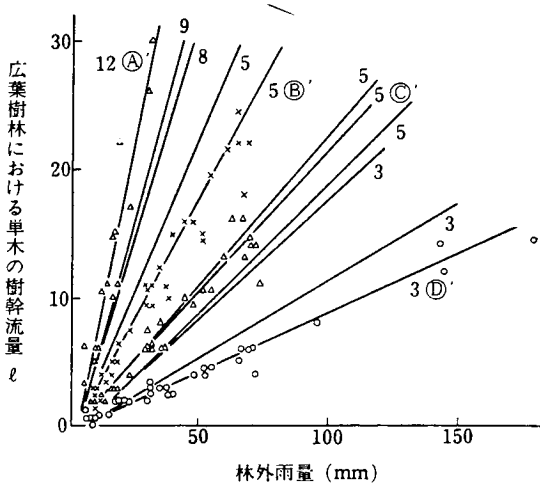
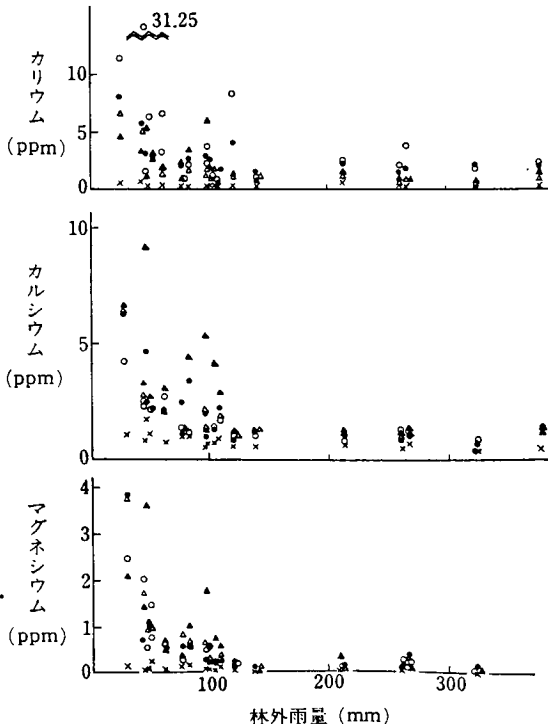
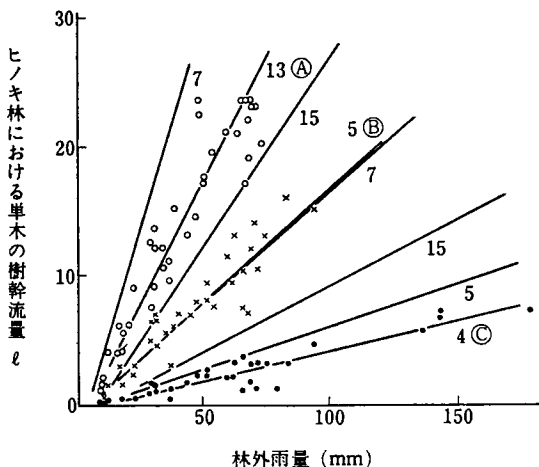
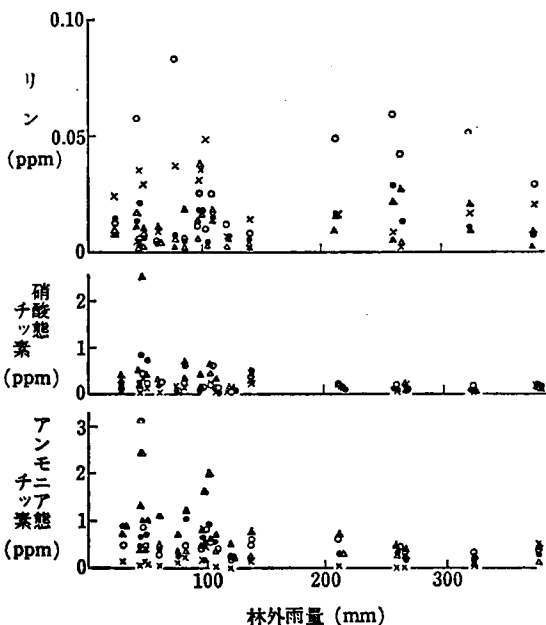


図4 林外雨量と各単木あたりの樹幹流量の関係。広葉樹林で3本、ヒノキ林で3本分のデータがplotされている。他については回歸線のみ記入されており、線上の数値は





胸高直径(cm)である。左図においてA'は△、B'は×、C'は△、D'は○。右図においてAは○、Bは×、Cは●の回歸線である。



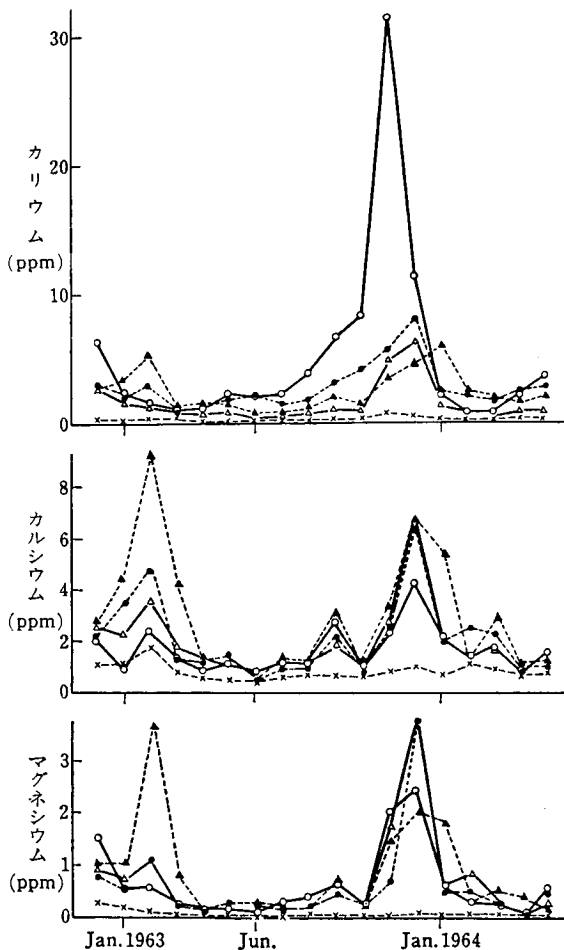
■ 5 林外雨量と雨水にふくまれる各養分元素の濃度の関係。×；林外雨，△；ヒノキ林の林内雨，▲；ヒノキ林の樹幹流，○；広葉樹林の林内雨，●；広葉樹林の樹幹流。

雨量とのあいだに一次の比例関係がみつめられた。しかし、落葉樹にかんしては、林内雨のばあいとは逆に、生育休止期に樹幹流量は減少する。葉がないので、集水面積が減少するからであろう。したがって、2本のリュウブについては、生育期・生育休止期にわけて回帰式をもとめた。しかし、どちらの期間も、林外雨と単木の樹幹流量のあいだには、ほぼ一次の比例関係のあることがみつめられた〔図2〕。

各試験木の樹幹流量と胸高直径のあいだには、ヒノキについては一定の関係はみつめられなかったが、11本のソヨゴについては、胸高直径がおおきいほど、樹幹流量がおおきい傾向が、図4にみられるとおりにあきらかである。

胸高直径と樹幹流が、一定の関係をもつためには、まず胸高直径と試験木の集水面積、すなわちクローネの表面積あるい

は平均枝張り直径などが、一定の関係をもつ必要がある。これは、同一林分の同一樹種ではおおむね満足されるだろうが〔戸田 1953〕、さらに枝のほりかたが問題になる。それが胸高直径の大小にかかわらず、一定でなければならない。さらに葉の形、樹皮が平滑かザラザラかも影響するだろう。葉が小片にわかれており、樹皮がざらついているものは、樹幹流が生じにくく、したがって胸高直径との関係もバラツキがおおきくなるだろう。常緑広葉樹のソヨゴは、流量がおおきく胸高直径と一定の関係をもつ条件を、ヒノキにくらべは



るかによくみたしている。すなわち、葉は平滑、枝は上向きで、樹皮も小片にわかれず連続的である。

5×5m² のなかの単木あたりの樹幹流量を合計して、林外雨量とのあいだに一次の関係をもとめた。

これと、林内雨ー林外雨の関係式を合計して、広葉樹林・ヒノキ林の林床にたつする雨量と林外雨量との関係式をえた。

広葉樹林

(1) 生育期(4月~10月)

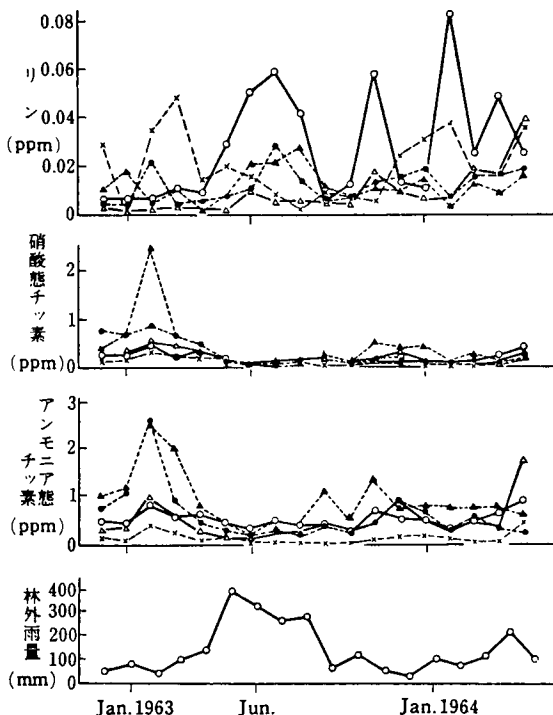


図 6 雨水にふくまれる養分物質の濃度の月変化。林外雨；
×....., ヒノキ林林内雨；——△——, ヒノキ林樹幹流；
△....., 広葉樹林林内雨；——○——, 広葉樹林樹幹流；
●.....

$$y=0.807x-1.08 \quad \text{ただし } x>9.0$$

S : 樹幹流量, T : 林内雨量, y : S と T の合計量, x : 林外雨量, 単位: mm

50mm の林外雨量があったとすると, 生育期の広葉樹林では, 樹幹流として24%, 林内雨として58%, 計82%が林床にたっし, 18%がクローネから蒸発する。生育休止期には, 樹幹流は18%であるが, 林内雨は68%となり合計86%が林床にたつする。ヒノキ林では, 一年を通じ樹幹流は6%, 林内雨は79%で85%が林床にたっし, 15%がクローネから蒸発する。すなわち, 広葉樹林では樹幹流がおおく, ヒノキ林では林内雨がおおいので, 生育期にはほぼおなじくらいの雨量が, 林床にたつすることになる。

樹幹流

$$S=0.264x-1.21$$

林内雨

$$T=0.589x-0.51$$

計

$$y=0.853x-1.72$$

ただし $x>8.5$

(2) 生育休止期 (11月
 ~3月)

樹幹流

$$S=0.211x-0.86$$

林内雨

$$T=0.712x-1.98$$

計

$$y=0.923x-2.84$$

ただし $x>11.6$

ヒノキ林

樹幹流

$$S=0.066x-0.32$$

林内雨

$$T=0.741x-0.76$$

計

林外雨・林内雨・樹幹流にふくまれる養分物質の濃度・量

1962年5月より、林外雨とともにヒノキ林・広葉樹林の林内雨と樹幹流の養分濃度を、それぞれ1カ月ごとまとめて分析測定した。樹幹流は、ヒノキ林については、プロット内8本の樹幹流をその流量に比例して混合し、分析した。広葉樹林については、常緑広葉樹（ソヨゴ、ツバキ）と落葉広葉樹（リュウブ）にわけ、それぞれ流量に比例して採取分析した。その濃度に流量を乗じて、物質量をもとめて合計し、さらにそれを流量合計で除して、広葉樹林の樹幹流の養分濃度を算出した。

1. 養分物質の濃度

各養分物質により、各雨水の種類により、それぞれ特有の性質をもっているが、概観的には、おおむね、降水量のすくない月には濃度がたかく、降水量のおおい月には濃度がひくい傾向がみとめられる〔図5、図6〕。

林外雨は、林内雨、樹幹流にくらべ、リンをのぞいて、もっとも濃度の変動の巾はちいさく、かつ濃度もひくい。しかし、林外雨にふくまれる養分物質は森林生態系にとって、外部よりの収入である。その起源について、カルシウム、マグネシウム、カリウム、リン

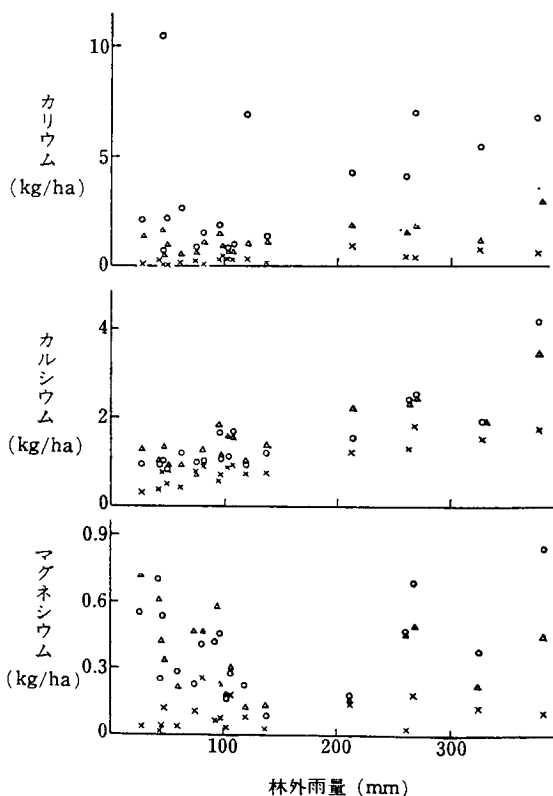
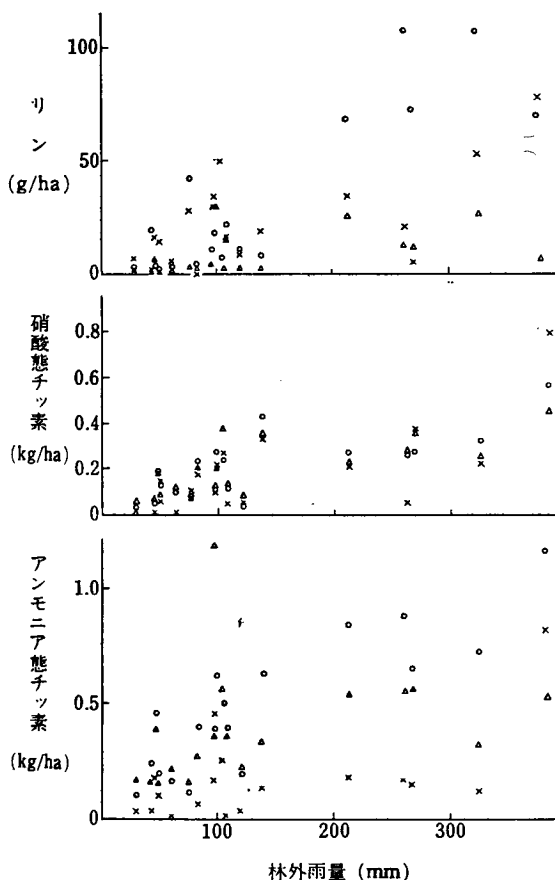


図7 林外雨量と雨水にふくまれる養分物質量の関係。林外雨；×，ヒノキ林の林内雨＋樹幹流；△，広葉樹林の林内雨＋樹幹流；○

は海塩にその起源をもち、濃縮されたエアロゾルが、雨水に吸着される〔三宅 1957〕。アンモニア態チッ素は、陸起源で地温と相関関係をもち夏期>冬期、低緯度>高緯度の関係がある〔Ångström 1952〕〔VIRTARNEN 1952〕。硝酸態チッ素は、空中で強い紫外線のもとで、光化学的にオゾンがチッ素を酸化して、硝酸態チッ素となるといわれている。しかし、最近の日本とくに工業都市の周辺にあっては、これら自然状態の物質の循環は、おおきく人間によって乱されている。pH 3~4 といった降水が観測されており、降水の性質は海岸からの距離や地温よりも、工場排出物の種類や工場からの距離にむしろ左右される状況になっている。今後、人間の影響を考慮しないこの種の調査は、無意味なものとなるだろう。



林内雨・樹幹流にふくまれる養分物質の濃度は、林外雨にくらべると、リンをのぞいて一般にたかく、かつ、変動の巾もおおきい。このような変化は、森林の地上部とくにクローネの部分を雨水が通過することによっておこる。濃度のたかくなる要因として、植物体からの養分の溶脱と、付着したエアロゾルが雨水に洗いだされるばあいが、かんがえられる。濃度のひくくなる要因は、植物体による吸収または吸着が考えられる。

林内雨の濃度の変動のもっともおおきいのはカリウムで、林外雨のカリウム濃度の最大最小値の

比は、 $0.70:0.16$ ppm で、
4.4倍であるのにたいし、
広葉樹林内雨は $31.25:$
 0.83 ppm で、37.7 倍に
たった。

広葉樹林内雨のカリウムは、落葉期とくに11月にとびぬけてたかい濃度をしめし、それは、林内雨を測定した1961, 62, 63年とも、明瞭にみとめられた〔丸山ら 1965〕〔岩坪ら 1967, 1968〕。これは、カリウムが植物体内でうごきやすく、かつ溶脱を受けやすい物質であり、さらに枯死しかけた葉からの水による溶脱は、生葉にくらべはるかにとおきいためにあらわれた現象であろう〔正垣ら 1965〕〔Stenlid 1958〕。

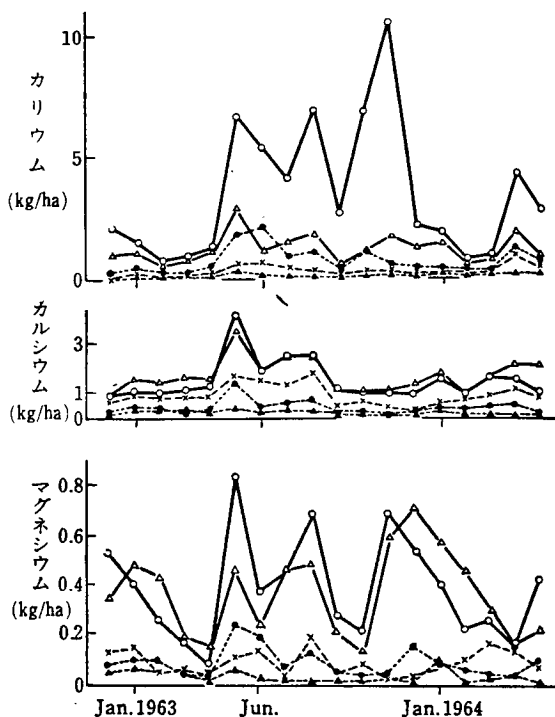


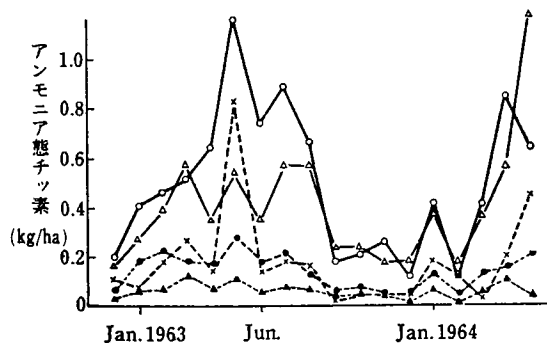
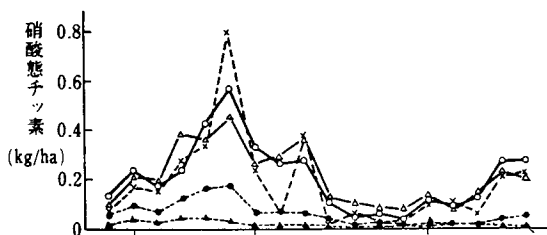
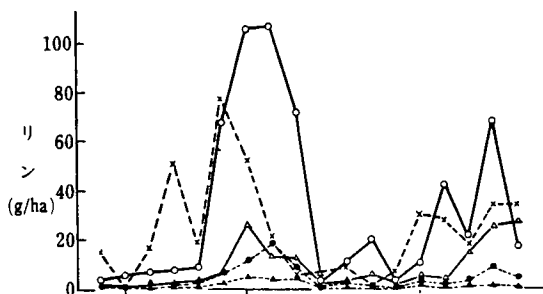
図 8 雨水にふくまれる養分物質量の月変化。林外雨；……△
………、ヒノキ林内雨；——△——、ヒノキ林樹幹流；……▲……
広葉樹林内雨；——○——、広葉樹林樹幹流；……●……

2. 養分物質の量

養分物質の濃度に、降水量を乗じて各月の雨水にふくまれる養分量をもとめた。

林外雨・林内雨・樹幹流とも、一般に雨量のおおいは養分濃度が ひくく、逆に雨量のすくない月は養分濃度がたかくなる傾向があるとのべた。しかし、これを養分量との関係でみると、図7にしめすように、たかい濃度とすくない雨量、ひくい濃度とおおい雨量が消しあって、養分量はほぼ一定になるというより、むしろ雨量の影響のほうがつよく、林外雨量のおおいにときに養分量もおおくなる傾向をしめしている。

しかし、広葉樹林のカリウムは例外で、さきにのべたように、11月の落葉期



に、雨量はすくないにもかかわらず、最大の養分量をしめしている。広葉樹の葉にふくまれるカリウムは、雨水に溶脱されやすく、とくに秋の落葉期には葉からの溶脱が明瞭にみとめられる〔図8〕。

カルシウムは、林外雨にはカリウムよりおおくふくまれてはいるが、林内雨の季節変化はカリウムと対照的に安定しており、その変化は植物の生理的变化よりも、雨量の変化になめらかに対応している。葉にふくまれるカルシウムは、カリウムのように葉の枯死期に急速に溶脱されるという性質をもたないことが原因しているようである。したがって、ヒノキ林と広

葉樹林の林内雨のカルシウム量にはほとんど差がなくなっているのであろう。

マグネシウムは、カリウムとカルシウムの中間的な傾向をしめしている。すなわち、落葉期には、枯死した葉からの溶脱によるとおもわれる養分量のたかまりがみられるが、カリウムほど顕著ではない。カリウムのように、広葉樹林ではヒノキ林にくらべ、きわだって多量がふくまれるといった傾向はなく、カルシウムのばあいとおなじように、だいたい両者並行して変化する。このことは、生理的な葉からの溶脱がマグネシウムにかんしては、カリウムのばあいほどには、ヒノキと広葉樹のあいだに差がないことをしめしている。

リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素についての林内雨にふくまれる養

表 2 エアロゾルの吸着による雨水の養分量の増加 mg/m^2

	プロット	降水量	降水回数	K	Ca	Mg
I	A) 対照区	158.9mm	9	45.5	199.5	93.8
	B) 試験区	(A/B) 133.2(0.84)	9	79.2(1.7)	413.2(2.1)	159.4(1.7)
II	A) 対照区	131.6	6	36.2	129.3	34.8
	B) 試験区	(A/B) 122.2(0.93)	6	58.6(1.6)	293.3(2.3)	86.4(2.5)

分量の月変化には、カリウムやマグネシウムにみられた¹¹⁾月の落葉期の高まりはほとんどみとめられない。降水量のおおかった夏期におおきい値をしめしている。カリウムのばあいとことなり、林外雨にふくまれる養分量が、林内雨の養分量とおおきな相関関係をもっているといえるだろう。リン、チッ素の養分量の変化で特徴的なのは、林内雨・樹幹流の合計養分量が、林外雨にふくまれる養分量よりちいさいばあいがしばしばみとめられることである。この現象は、苗畑でのカンレンボクの実験〔岩坪ら 1968〕、英国で *Quercus petraea* の林内雨の養分量を測定した Carlisle ら〔1966〕も報告している。Carlisle らは、有機態・無機態のチッ素について測定し、林内雨は林外雨より有機態チッ素の含有量は増加したが、無機態チッ素は逆に減少した。葉や着生植物による吸収または吸着によって無機態チッ素が減少し、植物体からの溶脱によって、有機態チッ素が増加したのであろう。また冬期に、林内雨のリンの量が林外雨より減少したのも、着生植物や枝・幹の吸着によるものであろうとのべている。

3. 林外雨と林内雨の養分量の相違

すでにのべてきたように、林外雨と林床にたつする雨水、すなわち林内雨＋樹幹流にふくまれる養分量に相違のおこる原因として、1) クローネによるエアロゾルの吸着、2) 植物体からの溶脱または溢出、3) 植物体による吸収または吸着、が考えられる。これらを量的に区分することは、すくなくとも森林規模では不可能であるが、その原因の可能性について考慮してみる。

1) クローネによるエアロゾルの吸着について

森林は広葉樹林で2.2～7.9 (片面)、針葉樹林で3～28 (両面) にたつする葉面積指数をもっている〔四手井 1963〕。森林はそのおおきな葉面積のため、エアロゾルのかたちで浮遊する養分物質を、裸地にくらべおおく吸着または付着するものとおもわれる。これが雨水に洗い流されることが、林内雨にふくまれる養分量が林外雨のそれよりおおきくなる原因のひとつであらう。この間の問題

P	NO ₃ -N	NH ₄ -N
4.72	19.0	40.0
3.62(0.8)	82.0(4.3)	107.8(2.7)
3.18	—	—
3.56(1.1)	—	—

を調べるため、モデル実験をおこなった。

50cm×50cm、深さ5cmのステンレス・スチール製の容器に雨水をうけ、これを対照区とした。どうじに、おなじ形の容器のうえに、50cm×50cmのステンレス・スチール製のネット10枚を約10cm間隔にかさね、荷電をふせぐため、対照区とともにアースして雨水をうけ、両者の雨水にふくまれる養分量を比較した。

9回分をまとめた雨水と6回分をまとめた雨水について、対照区と試験区の養分量を比較した。試験区の集水量は対照区の84%、94%と減少したが、カリウム、カルシウム、マグネシウムは、それぞれ表2のように、2回とも、似かよった割合で増加した。リンの養分量は、2回とも、対照区とかわらなかった。チッ素は、硝酸態チッ素4.3倍、アンモニア態チッ素2.7倍と試験区でたかい倍率をしめしたが、2回めは、雨水採取後日数がたちすぎたので、分析しなかった。

この実験のばあい、森林におけるような溶脱・吸収による養分量の増加減少

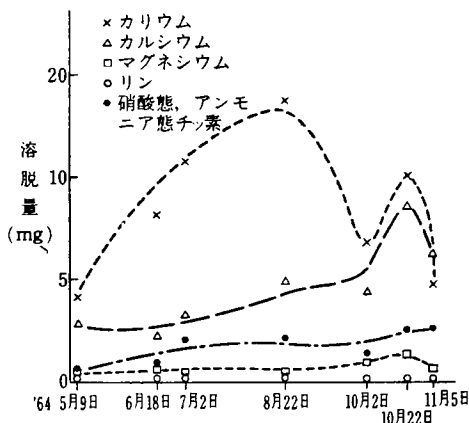


図9 ユリノキの葉100g(生葉)を3lの純水に6時間浸漬した場合の各養分元素の溶脱量

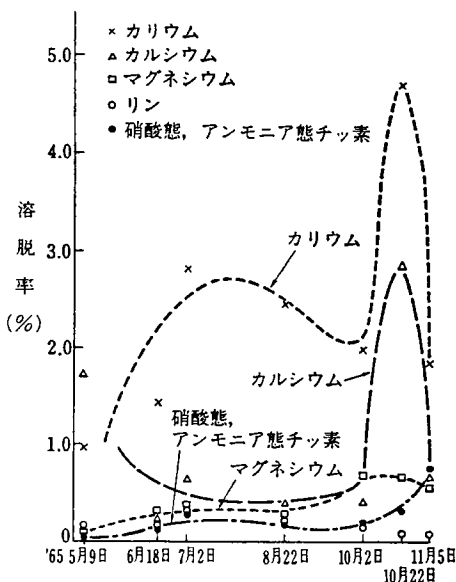


図10 ユリノキの葉からの養分溶脱量と葉の養分含有量の百分比

はおこらないから、試験区での養分量の増加は、浮遊するエアロゾルがネットに付着したためとかがえられる。

ネット1枚あたりの葉面積指数は、約0.8である。直接、この葉面積指数でもって、森林のばあいにあてはめることはできないとしても、葉面積指数のおおきい森林では、このていどの倍率の養分量が、降水によるもののほかに、外部から加えられている可能性は、じゅうぶんかんがえられる。

2) 溶脱について

すくなくとも、広葉樹林のカリウムについては、1961~63年のあいだの上賀茂広葉樹林、苗畑のイイギリ、カンレンボク林分などの林内雨の測定より、落葉期に多量溶脱されることは明瞭である。〔正垣ら 1965〕〔岩坪ら 1968〕

落葉期以外の時季についての動向をみるため、1964年5月~11月のあいだ、毎月ユリノキの生葉100gを3lの脱塩水に浸漬し、脱塩水への溶脱量の変化をみた。またどうじに、別の生葉100gを分析して養分含有量をもとめ、溶脱率の変化をしらべた〔図9、図10〕。

これより溶脱量は、カリウムが最大で、カルシウム、硝酸態・アンモニア態チッ素合計、マグネシウム、リンの順となった。カリウムは、8月と黄葉期に溶脱量のピークをしめし、カルシウムは黄葉期にのみピークをしめし、マグネシウム、チッ素、リンはあまり顕著なピークはしめさなかった。

100gの生葉の養分含有量は、カルシウムをのぞき、生育期初期にたかく、終期に急激に減少する傾向がみられ、逆に溶脱量と含有量の比、溶脱率はカリウム、カルシウムのばあい、終期に急増した。この実験では、溶脱量・溶脱率ともにおおきいのはカリウムとカルシウムであって、溶脱作用は、マグネシウム

表3 雨水にふくまれる養分量

		チッ素
京 都(上賀茂)	林内雨+樹幹流 (樹幹流)	8.5(3.1)
広 葉 樹 林	林 外 雨 差	5.5 3.0
京 都(上賀茂)	林内雨+樹幹流 (樹幹流)	7.4(1.7)
広 葉 樹 林	林 外 雨 差	3.5 3.9
京 都(上賀茂)	林内雨+樹幹流 (樹幹流)	7.9(1.1)
ヒ ノ キ 林	林 外 雨 差	5.5 2.4
京 都(上賀茂)	林内雨+樹幹流 (樹幹流)	7.0(0.7)
ヒ ノ キ 林	林 外 雨 差	3.5 3.5
京都(京大苗畑) カンレンボク3年	林 内 雨 林 外 雨 差	4.9 9.4 -4.5
英 国 Sessile Oak	林 内 雨 林 外 雨 差	8.82 9.54 -0.72
ガ ー ナ 熱帯降雨林	林 内 雨 林 外 雨 差	16.1 14.1 2.0

kg/ha·year

(硝酸態)	(アンモニア態)	リ	ン	カリウム	カルシウム	マグネシウム	降 水 量
2.7(0.9)	5.8(2.2)	0.2(0.1)	32.6(5.0)	15.8(4.3)	6.1(1.6)	1200.0mm	
1.7	3.8	0.5	2.7	8.8	1.3	1462.6	
1.0	2.0	-0.3	29.9	8.0	4.8		
2.0(0.4)	5.4(1.3)	0.5(0.1)	48.4(9.3)	17.7(4.6)	4.8(1.6)	1432.6	
1.4	2.1	0.2	4.5	10.6	1.1	1793.0	
0.6	3.3	0.3	43.9	7.1	3.7		
2.7(0.3)	5.2(0.8)	0.0(0.0)	11.3(1.2)	16.0(1.6)	3.5(0.4)	1151.8	
1.7	3.8	0.5	2.7	8.8	1.3	1462.6	
1.0	1.4	-0.5	8.6	7.2	2.2		
2.1(0.2)	4.9(0.5)	0.1(0.0)	14.7(1.6)	18.3(1.7)	4.6(0.4)	1335.2	
1.4	2.1	0.2	4.5	10.6	1.1	1793.0	
0.7	2.8	-0.1	10.2	7.7	3.5		
1.0	3.9	1.5	27.5	25.3	1.0	1162.2	
2.0	7.4	0.7	7.0	19.6	1.0	1713.8	
-1.0	-3.5	0.8	20.5	5.7	0		
		1.31	28.17	17.18	9.36		
		0.43	3.0	7.30	4.63		
		0.88	25.17	9.88	4.73		
		4.1	238.6	41.8	29.4		
		0.4	17.6	12.8	11.4		
		3.7	221.0	29.0	18.0		

ム、リン、チッ素には、あまりおおきな影響をあたえてはいないとおもわれる。

MECKLENBURG ら [1964] は、カルシウムの同位元素をもちいて、水耕栽培をおこない、地上部にキリを吹きつけることにより、カルシウムの溶脱がおり、それを補充するために、対照区にくらべ、多量のカルシウムが吸収されたと報告している。それならば、雨水による溶脱は、生育終期の溶脱のように、ただ、リターとして落下するまえに溶脱したというだけではなく、生育中にも吸収・還元がおこなわれており、森林生態系内での物質循環のリターをへない吸収・還元の経路であるといえよう。

3) 植物体による吸収について

上賀茂ヒノキ・広葉樹林・苗畑カンレンボクの林内雨と林外雨の測定におい

表 4 地表流・地中流の年平均養分濃度

ppm

		硝 酸 チ ッ 素	ア ン モ ニ ア 態 チ ッ 素	リ ン	カリウム	カルシウム	マグネシウム
広葉樹林	地表流	0.19	0.39	0.044	4.12	2.34	0.70
	地中流	0.21	0.31	0.028	3.99	4.75	1.33
ヒノキ林	地表流	0.12	0.37	0.029	0.88	1.70	0.27
	地中活	0.08	0.35	0.023	1.14	2.13	0.51

測定期間1965年1月～12月

林外降水量 2238.3mm

て、リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッ素のばあいには、林外雨の濃度が林内雨よりたかいばあいがみられる。これらの元素にかんしては、溶脱はあまりおこらないとしても、クローネが吸着したエアロゾルは林内雨の濃度をたかめる方向に働くはずである。とすると、クローネからの蒸発によりあるていど濃縮されているにもかかわらず、なおかつ林内雨の養分濃度が林外雨よりひくいばあいには、植物体と接することによって、植物体に吸収されたか、あるいは吸着され不溶性物質になって残ったとかんがえざるをえない。

同位元素を葉面撒布または塗布した実験により、無機態・有機態のチッ素やリンが葉面から吸収されるとの報告もあり [Throne 1955]、また実際に果樹園などでは、肥料の葉面撒布がおこなわれている。ただし、これらのばあい、3%硝安・1%尿素など高濃度のものを使用している。雨水のばあいは、年平均濃度硝酸態チッ素 0.8 ppm, リン 0.014 ppm といった低濃度である。したがって、量的には、さほどおおきいものとはいえないだろうが、生態系外部から直接、葉面へという経路は、森林生態系の物質循環にとって、これまであまり注目されていなかった経路である。

森林にふった雨は、以上のべたような過程をへて林床に到達する。すなわち、林外雨から林内雨と樹幹流にかわるわけであるが、それらの年間の合計量を比較してみる [表3]。

どの森林についても明瞭なのは、カリウムの養分量が林外雨のそれにくらべておおく、カリウムが溶脱を受けやすい物質であることである。エアロゾルの付着をみるための、ステンレス・スチールのネットによる実験では、試験区はせいぜい対照区の2倍量で、カルシウム、マグネシウムのばあいと差はなかったが、広葉樹林では林外雨の10倍以上が林内雨にふくまれているばあいがおおい。このことから、とくに広葉樹林のカリウムは、雨水による溶脱の傾向が

はなはだしいといえるだろう。

カルシウムは、エアロゾルの実験で2倍量となり、かつ脱塩水への浸漬実験や同位元素による溶脱実験でも、カリウムについて溶脱が ocorrência やすいことが、たしかめられている。林内雨・林外雨にふくまれる量の差は、カリウムについておおいが、比率にすればせいぜい2倍であり、エアロゾルの付着と溶脱と、どちらがおおきく原因しているか不明である。

マグネシウムは、上賀茂のデータからは、カリウムほどではないが溶脱が影響しているようにみえる。しかし、苗畑のカンレンボクの実験では、林内雨にふくまれるマグネシウムの増加はみとめられず、英国とガーナの例でも、カルシウムの増加の比率とそれほどかわらない。

チッ素とリンは、さきにのべたように、林内雨にふくまれる量が林外雨よりちいさいばあいが見られる。チッ素・リンとも溶脱はうけにくい元素であり、さらにチッ素はエアロゾルによる増加量のおおきい元素であるのに、なおかつ、林内雨の養分量が林外雨よりすくないということは、そうとう積極的に、葉面からの吸収がおこなわれている可能性がある。

林内雨にふくまれる養分量は、京都・英国の広葉樹林ともおおよそ似かよった値をしめしている。ガーナの熱帯降雨林の林内雨の養分量は、とくにカリウムなど、ずばぬけておおきい。このおおきな溶脱量は、熱帯降雨林のおおきな養分物質の循環速度の一因になっているとかんがえられる。

地表流・地中流にふくまれる養分物質の濃度

林床に到達してから、溪流にいたるまでの雨水は、一般に、地表を流れて溪流にいたるもの（直接、溪流に降つた雨をふくむ）、すなわち表面流出水と、いったん地表下に浸透し、土層や岩石孔隙内を通過したのち溪流にあらわれるもの、すなわち地下流出水にわけられる。しかし、このわけかたは溪流の地点からの分類である。本実験で測定した地表流・地中流は、溪流にいたるまで経路の変化がないとは保証できない。本実験における地表流・地中流は、あくまでヒノキ林・広葉樹林の斜面の一部における地表流と、地中10 cmでの地中流と限定し、量水堰堤における量水曲線を分析してえられる表面流出量・基底流量とは区別しておく。

地表流・地中流の測定期間は、1965年1月～12月で、この期間、林外雨・林

内雨・樹幹流・溪流にかんする測定はおこなっていない。

林床における地表流の流路は、林床植物、A層、地形などの状態に影響され、林内雨よりさらに均一性を欠いている。ヒノキ林に5コ、広葉樹林に3コ埋めこんだ一辺50cmの正六角形の、地表流をうけるためのライシメーターの、それぞれの集水量は、大幅にバラツキをしめた。しかし、それぞれのプロットの集水量と林外雨量の関係は、林内雨のばあいとおなじように、一次の関係であった。年林外雨量2,238.3mmにたいし、各プロットの地表流量は、広葉樹林で9.5, 10.2, 18.7%, ヒノキ林で3.4, 4.4, 6.0, 15.3, 26.6%であった。傾斜による集水面積の相違を考慮して平均値をだし、林外雨量にたいし、年間、広葉樹林で12.8%, ヒノキ林で11.0%が地表流として流れたことになった。

さきにのべたように、林内雨と樹幹流として、林床に達する雨量は、広葉樹林で約80%, ヒノキ林で74%であるから、広葉樹林では林外雨量の約67%, ヒノキ林で約63%にあたる雨水が、年間、地中流になるかあるいは地表流・地中流からの蒸発散、すなわち植物に吸収されるか、直接蒸発していることになる。

各プロットの集水量(単位: l)に各プロットの養分濃度(ppm)を乗じて養分量をもとめ、その合計量を各プロットの集水面積の合計で除して、haあたりの養分量をもとめた。これを集水量合計を集水面積合計で除してもとめた単位面積あたりの集水量 mm/ha で除し、平均濃度をもとめた。〔表4〕

この実験でいう地中流については、広葉樹林・ヒノキ林に2コずつ、上縁が地中10cmになるように、樋を埋めて採取した。このばあい、集水面積を規定することができないのと、2プロットのあいだの濃度差が、地表流にくらべてちいさいので、ふたつのプロットの養分濃度をそのまま算術平均して、それぞれの林の平均養分濃度とした。年平均濃度は、樋があつめた集水量(l)と林外雨が一次の関係をもっていることから、おおよそ $y=ax$ がなりたつとし、各月の濃度に林外雨量を乗じて養分量を算出し、それを年林外雨量合計で除して、算出した(表4)。

地表流・地中流の養分濃度に影響をあたえる因子として、降水量、リター量、リターの分解に影響する気温、林内雨・樹幹流の養分濃度などがかんがえられる。また養分元素の性質によって、リターから溶脱されやすいもの、されにくいものがある。

これらを考慮しながら、図11の地表流・地中流の月別濃度変化を考慮する。カリウムについては、林内雨・樹幹流のばあいとおなじように、林外雨のすく

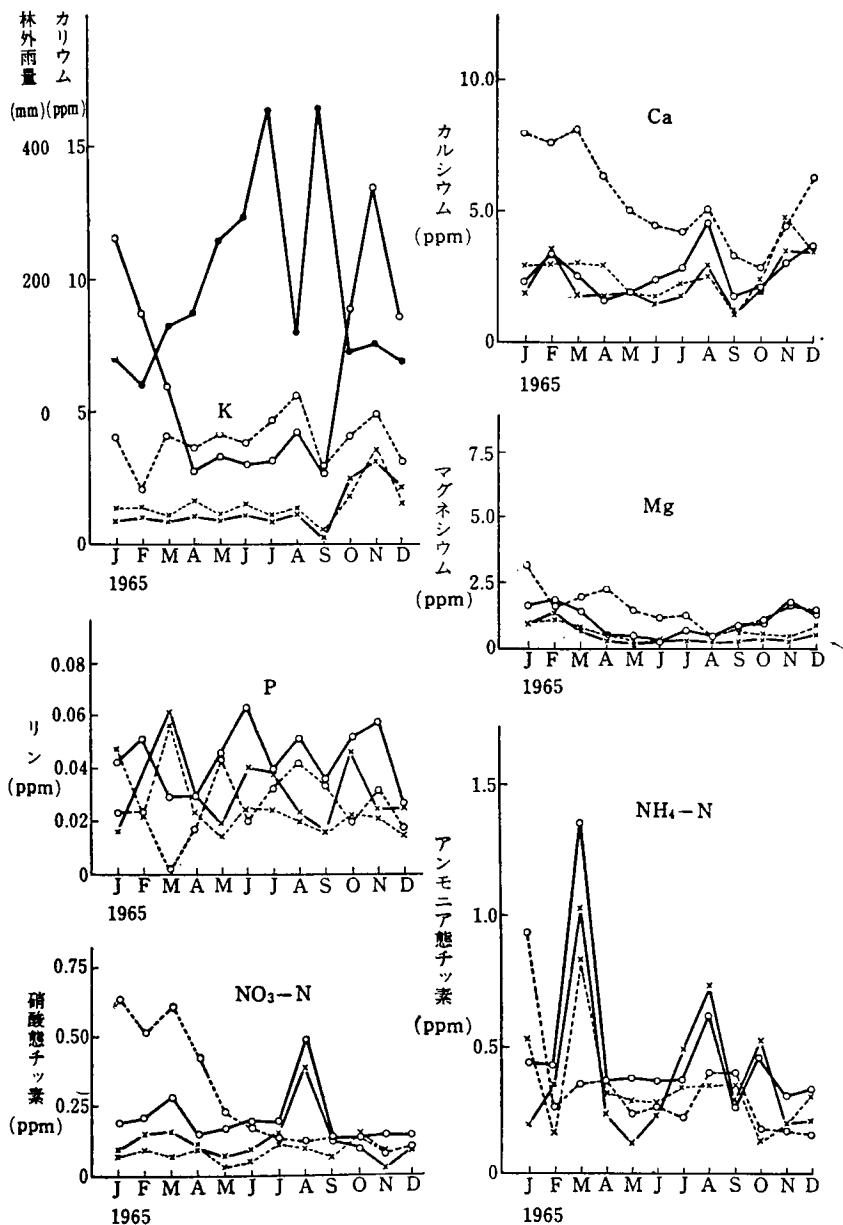


図11 地表流・地中流にふくまれる養分物質の濃度の月変化。ヒノキ林地表流；——×——，ヒノキ林地中流；——○——，広葉樹林地表流；……×……，広葉樹林地中流；……○……。

表 5 地表流にふくまれる養分物質量

kg/ha·year

	plot	K	Ca	Mg	P	NO ₃ -N	NH ₄ -N	流 量
ヒノキ林	1	1.1	1.5	0.3	0.03	0.1	0.1	98.2mm
	2	4.7	10.2	1.7	0.13	1.0	2.0	594.8
	3	0.8	2.0	0.3	0.03	0.1	0.4	133.8
	4	0.6	1.2	0.1	0.03	0.1	0.4	77.1
	5	3.9	6.5	1.0	0.14	0.3	1.3	343.5
	平 均	2.2	4.2	0.7	0.07	0.3	0.9	246.6
広葉樹林	1	12.3	5.0	1.4	0.10	0.6	1.3	229.1mm
	2	15.0	10.1	2.9	0.17	0.8	1.5	419.6
	3	7.6	4.5	1.6	0.09	0.2	0.5	213.7
	平 均	11.8	6.7	2.0	0.13	0.5	1.1	286.1

註 林外雨量; 2238.3mm

ない月にたかい濃度がみられた。とくに、広葉樹林の地表流のカリウムにその傾向がいちじるしく、11月の落葉期に最高値をしめした。降水量のすくない月が、ちょうど秋から冬にあたり、新鮮でかつ溶脱を受けやすい落葉からの溶脱がおおきく、それはあまりうすめられないというふたつの原因がかさなりあったものとかがえられる。しかし、4月から9月の生育期には、地中流のほうが地表流よりたかい濃度をしめした。また、ヒノキ林ではおおむね地中流のほうがたかいカリウム濃度をしめした。

カルシウム、マグネシウムについては、広葉樹林のカリウムのばあいのような、地表流の秋・冬期のたかまりはみられず、地中流の濃度が地表流よりたかい傾向がみられ、とくにそれは広葉樹林にいちじるしい。カルシウム、マグネシウムは、カリウムにくらべ、植物体からの溶脱がおこりにくく、逆に土壌のなかで動きやすい性質をもっているためであろう。

リンのばあい、各月のバラツキがおおきく、一定の傾向はみられないが、つねに地中流の濃度がおなじ月の地表流よりひくかったことは、カルシウム、マグネシウムと逆の傾向である。リンは、土壌中で不溶性の化合物をつくりやすく、動きにくい元素であるとの説に合致している。

硝酸態・アンモニア態チッ素の地表における8月のたかまりは、気温がたかくリターの分解がはげしいうえに、降水量がわりあいすくなく、うすめられなかったことによるのであろうか。アンモニア態チッ素が3月にたかい濃度をしめした原因はわからない。1月から5月まで、広葉樹林地中流における硝酸態チッ素は、地表流よりたかい濃度をしめしたが、全体的には、リン・硝酸態チ

ッ素・アンモニア態チッ素にかんしては、地中流が地表流よりひくい濃度をしめす傾向があるようである。

地中流は、その流量の測定ができていないので、ha 当りの年間養分含有量の算出はできないが、地表流については可能である(表5)。しかし、林内にたつる雨水とそれにふくまれる養分物質は、地表流・地中流・蒸発散の3経路にわかれるから、地表流の養分量だけではこの段階における養分物質の移動状況は確認できない。

溪流にふくまれる養分物質の濃度・量

1. 量水堰堤

溪流の水にふくまれる養分物質は、森林生態系の収支にとって、支出にあたる。

この実験をおこなってきた広葉樹林の下流に、量水堰堤が設けられており、水位が観測されている。京都大学農学部農業工学教室の厚意により、実験期間の流出水位記録を借用し、流出量を算出した。

養分濃度を測定するため、堰堤より越流した水を採取・分析した。試料を採取した間隔は、毎日のばあいから、1週間にいちどのばあいまでである。養分量は、養分濃度に水位記録より計算した流出量を乗じてもとめた。

富士岡ら[1962]によれば、量水堰堤の設置されている溪流は、流域面積4.39haを有し、流路250m、流域平均幅136.5m、流域平均勾配 $28^{\circ}30'$ の流域特性値をもつものである。流域の一部に各種のマツ類の植林があるが、大部分は、本実験にもちいた常緑落葉混交広葉樹林におおわれている。母岩は、秩父古生層にぞくする粘板岩である。

量水堰堤は、刃形円形堰(内径10cm)および刃形矩形堰(越流幅200cm)を複合した鉄製堰板よりできている。

2. 流出水量

溪流の水にふくまれる養分物質の分析は、1961年7月より63年4月までおこなった。この実験期間中、1年間連続して流出水位のデータがえられたのは、1962年5月から翌年4月までの期間のみであった。なお、溪流水の分析はおこなっていないが、1966年5月から翌年4月までの各月の流出量を、比較のためにかかげた[表6]。流出量は、流出体積を流域面積で除し、mmであらわした。

表 6 林外雨量と広葉樹林の流出量

	1962 ~ 1963		1966 ~ 1967	
	林外雨量 (P)	溪流流出量 (D)	林外雨量 (P)	溪流流出量 (D)
May	148.3mm	83.6mm	218.2mm	113.9mm
Jun.	380.3	284.5	192.1	124.9
Jul.	239.3	184.2	267.8	198.9
Aug.	117.0	33.0	145.9	57.8
Sep.	43.9	9.5	211.6	146.1
Oct.	63.6	6.3	75.0	51.8
Nov.	48.7	4.0	70.9	26.7
Dec.	49.1	5.7	73.8	28.5
Jan.	83.1	13.9	97.9	51.1
Feb.	46.3	16.0	33.5	32.0
Mar.	104.2	31.9	157.8	110.1
Apr.	138.8	77.0	251.0	196.4
Total	1,462.6	749.6	1,795.5	1,138.2
	$P - D = 713.0\text{mm}$ $\frac{D}{P} \times 100 = 51.3\%$		$P - D = 657.3\text{mm}$ $\frac{D}{P} \times 100 = 63.4\%$	

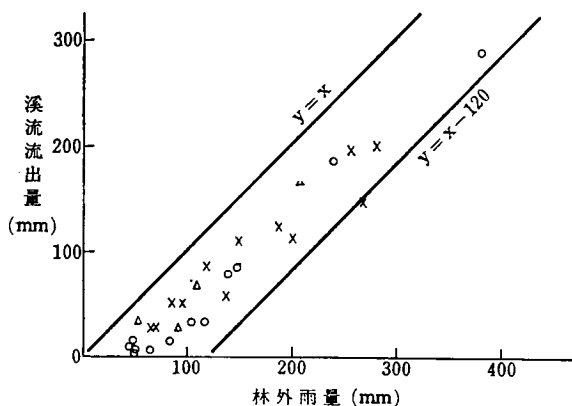


図12 林外雨量と溪流流出量の関係

×; May '66~Apr. '67, ○; May '62~Apr. '63, Δ; Jul. '61~Dec. '61.

地のデータより、消失率は降水量の増加にともない、直線的に減少することをしめしている。林外降水量と溪流流失量を、ひと月ごとにまとめてプロットした〔図12〕。両者の関係は、一般に、 $y = x - \alpha$ を下限の漸近線とする指数関数によってあらわされるといわれるが〔荻原 1967〕、本実験のデータはバラツキ

62~63年のものは、年間降水量1,462.6mmで、上賀茂試験地の年平均降水量1,666.2mmにくらべ、ややすくない。1,795.5mmで、年平均降水量より大であった66~67年のものにくらべると、流出量も流出率もちいさい。しかし、消失量は62年のもののほうが、むしろおおきかった。もっとも乾燥した月でも、土壌含有水量が零にならないとかんがえられるこの地域では〔堤 1963〕、むしろ降水量がちいさい年のほうが晴天日数がおおく、蒸発散による消失量がおおきくなるとかんがえられる。この傾向は、武田〔1950〕LIKENSら〔1967〕の報告にもみとめられる。四手井〔1963〕は、夏半年の釜淵・高島両理水試験

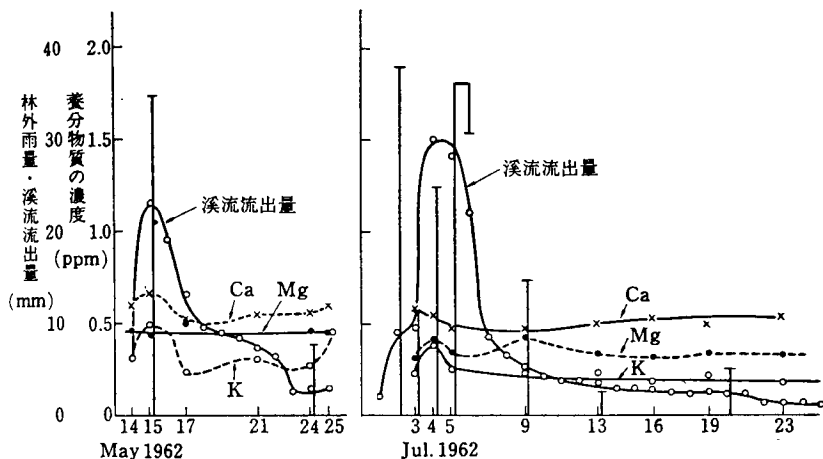


図13 溪流流出量と養分物質の濃度（縦線は降水量をしめす）

がおおきいので、回帰式はもとめず、一回の分析ごとに濃度に流出量を乗じて、養分量を算出した。

3. 流出水の濃度変化

降雨にともなうて、溪流の流出量は時間的に変化する。その変化に応じて、養分濃度はどのように変わるのか。図13は、林外雨量、流出量および流出水の養分濃度の時間的な変化を数日にわたって、図示したものである。1日30mmをこえるような林外雨量のばあいは溪流の流出量は急増するが、流出水の濃度は林内雨や樹幹流のばあいのように、うすめられてひくくなる傾向はなく、ほとんどかわらないか、やや増加するようである。養分量は流出水量に濃度を乗じたものであるから、養分量の変化は流出量の変化とおなじくらいか、それ以上となる。地表流・地中流の急増にともなうて、土壌中の養分物質の溶脱が促進されるためとかんがえられる。

ひと月ごとにまとめた流出水の養分濃度の変化を、おなじ月の林外雨の濃度、広葉樹林の林内雨+樹幹流の濃度（養分量合計を雨水量合計でわったもの）と比較すると、三者のうち溪流水の濃度がもっとも変化がすくなく、安定しており、かつ、濃度もひくい〔図14〕。カリウム、カルシウム、マグネシウムのばあい、林内雨樹幹流の濃度変化はかなり幅ひろく、とくにカリウムは、11月の落葉期に突出したたかい値をしめし、その影響は地表流にまであらわれたが、溪流水はほとんど影響をうけていない。また、リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チ

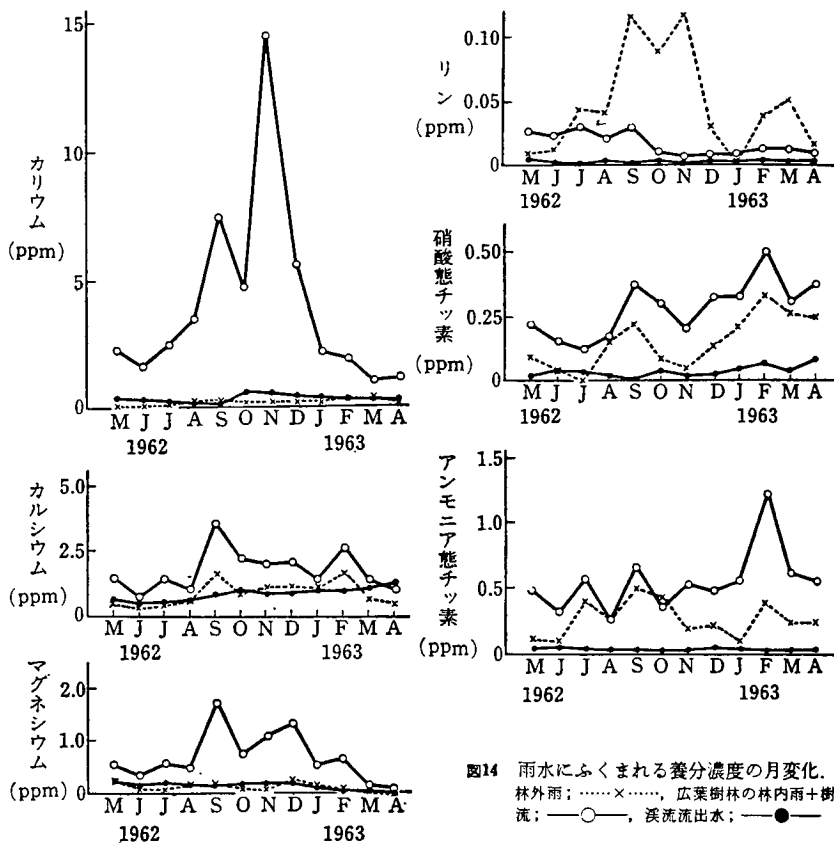


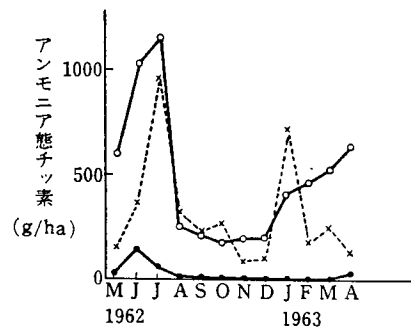
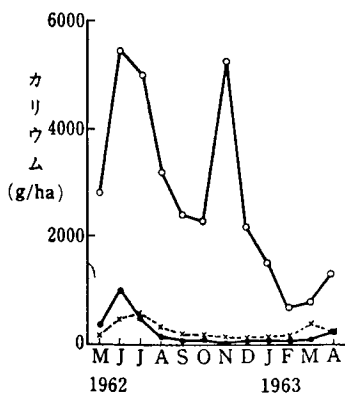
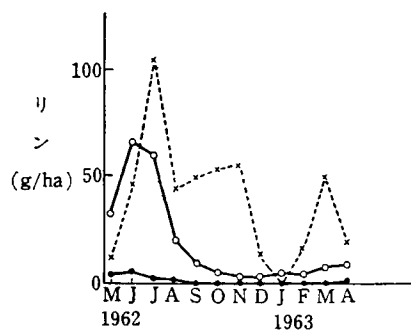
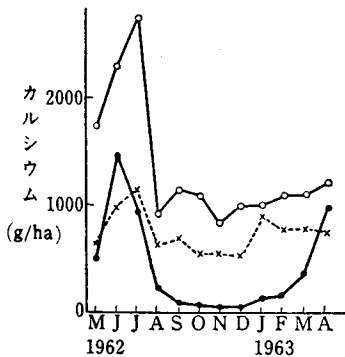
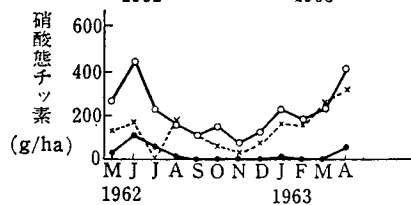
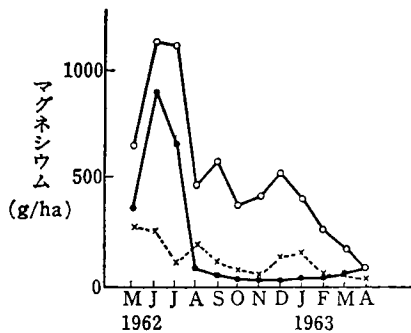
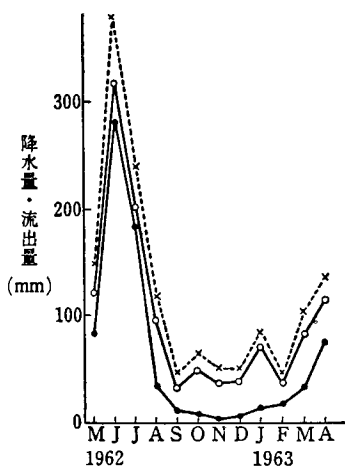
図14 雨水にふくまれる養分濃度の月変化。
林外雨；……×……，広葉樹林の林内雨+樹幹流；——○——，溪流出水；——●——

ッ素は、林外雨の濃度変動がそうとうおおきいが、この影響も溪流水はほとんどうけていない。すなわち、溪流の水質は各季節をつうじて、また流水量のおおきいときもちいさいときも、ほとんどかわらない養分濃度を維持するようである。

このことから、林内雨・樹幹流が林床に到達してのち、溪流にいたるまでの通路である森林土壌は、そこを通過する流水の養分物質にたいして、ひじょうにおおきな、安定した緩衝の機能をもっているといえるだろう。

4. 流出水にふくまれる養分量

溪流水とともに流出する養分量の月変化を、おなじ月の林外雨、広葉樹林の林内雨+樹幹流の養分量変化とともに図示したものが図15である。



■15 雨水にふくまれる養分量の月変化。

林外雨；……×……，広葉樹林の林内雨+樹幹流；——○——，溪流流出水；——●——

年間雨水量合計は、林外雨が1,462.6mm、林内雨+樹幹流が1,200.0mmで、林外雨量の82.0%、溪流水は749.5mmで林外雨量の51.2%である。

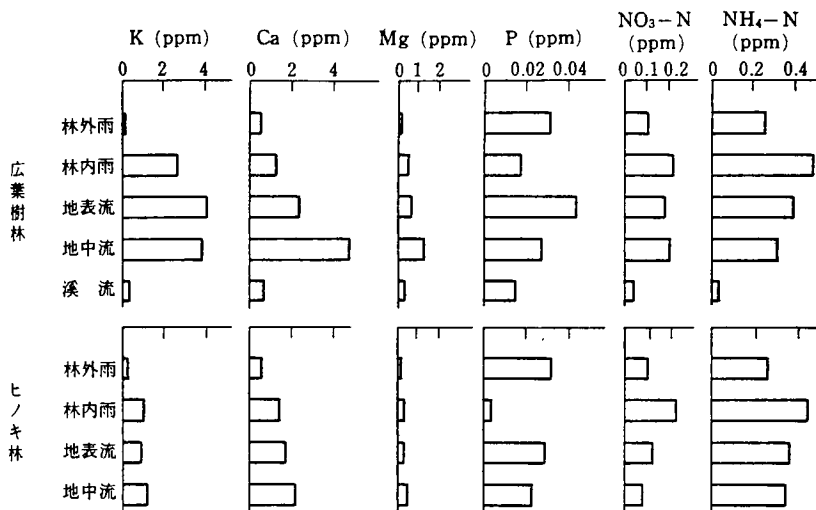
溪流水の養分量の変化は、養分濃度の変化についてのべたように、森林土壌というおおきなバッファを通過した状態をよくあらわしている。すなわち、全体の傾向としてその養分量の変動は、流出量の変動にゆるやかに対応し、林内雨+樹幹流のばあいの、とくにカリウムにみられるような植物の生理的反応や、リン、アンモニア態チッ素にみられるような、林外雨にふくまれる養分量の変化の影響をほとんどうけないようである。したがって、林外雨量・流出量がよほどおおきい月にのみ、林外雨にふくまれる養分量より溪流にふくまれるもののほうがおおきいばあい、カリウム、カルシウム、マグネシウムでみられた。しかし、降水量のちいさいときには、林外雨にふくまれる養分量より、流出養分量はちいさいし、リン、チッ素にかんしては、つねに森林土壌に口過され、ちいさくなっているといえる。すなわち、養分物質は森林土壌に蓄積されているといえるだろう。

雨水にふくまれる養分物質の濃度・量の森林での垂直的变化

いままでのべた林外雨、林内雨+樹幹流、地表流、地中流、溪流にふくまれる養分濃度・量を一貫して比較検討する。

森林にふった雨水(林外雨)は、クローネからの蒸発により、その量をやや減じて林床にたつする(林内雨+樹幹流)。これは、蒸発散によりさらにその量を減じつつ、地表・地中をとおり(地表流・地中流)、溪流となって、森林外に流出する。

その間、水に溶けている養分物質は、きわめて複雑な動きをする。林外雨にふくまれる養分物質は、クローネに付着している養分が洗いだされることにより、さらに植物体から養分が溶出されることにより、増加する。この溶出は、さらにこれを補給するために、あらたな根からの吸収を促進するという。一方では、直接クローネに吸収される部分もある。地表に流下してから、リターや土壌にふくまれている養分を溶脱するが、植物に根から吸収されたり、土壌のイオン置換作用その他の保蓄作用によって、土壌に吸着されたりする経過のうち、溪流水として流出する。



林内雨：樹幹流をふくむ。地中流：10cm 深

図16 森林各層の通過によっておこる養分物質の濃度変化（年平均）。

1. 養分濃度の垂直的变化

図16は、各層の雨水にふくまれる養分物質の年平均濃度の垂直的变化をしめしている。平均濃度は、年合計養分量を雨水量でわってとめた。林外雨、林内雨+樹幹流、溪流については、1962年5月から翌年4月までの測定によるが、地表流・地中流の測定期間は1965年1月から12月である。62年の降水量は、1,462.6mmで、65年は2,238.3mmであった。降水量のちいさいばあい、地表流・地中流の濃度はややたかくなるかもしれない。ヒノキ林の下流には、量水堰堤はない。

垂直的变化の型として、6種類の養分物質をふたつのグループに分けられるだろう。すなわち、カリウム、カルシウム、マグネシウムの変化の型、K・Ca・Mg型と、リン・硝酸態チッ素・アンモニア態チッソの変化の型、P・N・N型である。前者のグループは、すべてカチオンである。後者は、リン・硝酸態チッ素はアニオンで、アンモニア態チッ素はカチオンである。

K・Ca・Mg型は、林内雨+樹幹流・地表流・地中流の三層、すなわち森林内部では、P・N・N型にくらべ濃度がたかい。さらにこの三層において、K・Ca・Mg型は下層ほど濃度がたかくなるのにたいして、P・N・N型は逆

にひくくなる傾向がみとめられる。稲川ら [1965] の箱型ライシメーターによる地表流と、地中 50cm の浸透水の濃度測定においても、この傾向がみとめられる。ただし、林内雨+樹幹流のリンの濃度は、広葉樹林・ヒノキ林ともに、林外雨よりはるかにひくく、分析した 6 種類の養分元素をつうじて例外である。広葉樹林で、林外雨と溪流の濃度を比べると、 $K \cdot Ca \cdot Mg$ 型では、溪流の濃度がたかいのにたいし、 $P \cdot N$ 型ではひくくなっている。

地下 10cm の流水、すなわち本実験の地中流の濃度にくらべ、溪流水の濃度はずっとひくくなっている。この現象は、6 種類の養分元素に共通してみられた。本実験では、この間の状態についてのデータはまったくないが、斜面上部・下部で、それぞれ地中 10cm, 30cm, 50cm における土壌水の養分濃度・量を測定した有光ら [1964] も、下層になるほど養分濃度が低下したことを報告している。森林土壌の中を通過することにより、チッ素・リンはもとより、それより土壌のなかでうごきやすいカリウム、カルシウム、マグネシウムも、吸収または置換されるか、あるいは不溶態となって、土壌に蓄積されるものとおもわれる。

$K \cdot Ca \cdot Mg$ 型の三種の元素が、林内・地表・地中 10cm まで、つぎつぎと濃度がたかくなっていくことは、とちゅうあるていど吸収や吸着がおこなわれるであろうが、やはり植物体や A_0 層、表層土からの溶脱がおおきく影響しているとおもわれる。地中 10cm から溪流にいたるあいだに、吸収・吸着がおこなわれるのであろう。そうとう濃度はひくくなるが、それでもなお、林外雨よりはたかい濃度をしめしている。

$P \cdot N \cdot N$ 型の変化は、チッ素やリンが植物体や土壌に吸収・吸着されたり、不溶性の化合物をつくりやすい性質であることをあらわしている。もちろん、溶脱がまったくおこらないのではない。脱塩水への浸漬実験でも、溶脱はおこっており、また生育期間中に、林外雨よりもおおくの養分量が林内雨+樹幹流にふくまれていることもしばしばあり、これをすべて、付着したエアロゾルの洗脱による増加とはいいいがたい。しかし、 $K \cdot Ca \cdot Mg$ 型にくらべると、林床にたつするまでに植物体に吸収されやすいことは、リンのばあいはもちろん、チッ素のばあいも、林外雨より林内雨の養分濃度のほうがひくいことがよくあることから想像しうる。リンのばあい、林外雨よりひくい濃度になった林内雨は、リターからの溶脱で地表流はあるていどたかくなるが、地中を通過することで急速に吸収・吸着されてしまうようである。チッ素は、年平均したばあい、

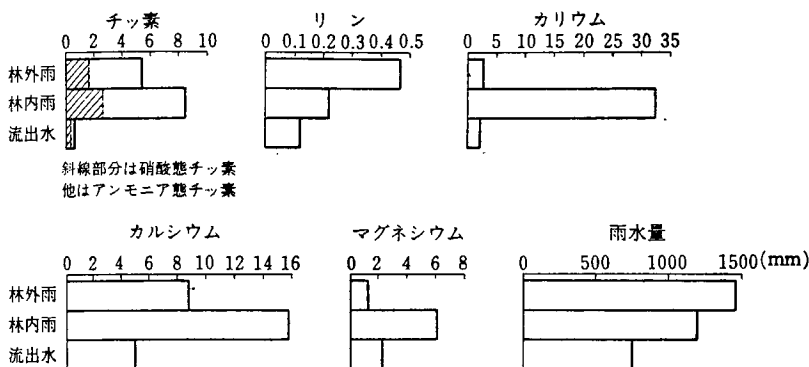


図17 広葉樹林における水溶性養分量の垂直的变化
林内雨・樹幹流をふくむ May 1962~Apr. 1963

kg/ha·year

林外雨より林内雨はたかいが、地表・地中を通過することにより、濃度はひくくなっていく。溪流水の濃度は、林外雨よりもずっとひくくなり、森林生態系の収支にとって、リン・チッ素はおおきくプラスであることをしめしている。

2. 養分量の垂直的变化

溪流水の測定をおこなった広葉樹林における養分量の垂直的变化について考察する。地中流量の測定ができていないので、雨水が林床に達してから、溪流にいたる中間での、すなわち森林土壌部分での雨水に溶けて動く養分量の測定は、欠如している。したがって、養分量の垂直的变化は、広葉樹林のクローネの上、林床の上、溪流の3段階についてのみのべる。

1962年5月から翌年4月までの実験期間、林外雨量は1,462.6mmであった。このうち、広葉樹林のクローネをとおり、林内雨・樹幹流として林内にたっしたのは、1,200mmで、林外雨量の18%がクローネから蒸発によってうしなわれた。さらに、地表流・地中流として流下し、量水堰堤にたっしたときには、749.5mmで林外降水量の51%になっていた。実験をはじめたときと、おわったとき、すなわち1水年のはじめとおわりにおいて、土壌含有水量はひとしいと仮定すれば、森林にふった雨のうち、18%はクローネから蒸発し、31%が地床からの蒸発と植物の吸収による蒸散によってうしなわれ、51%が溪流水として流出したことになる。

林外雨、林内雨+樹幹流・溪流に1年間にふくまれる各養分量は、図17のとおりである。

林外雨にふくまれる養分量は、森林生態系にとって収入である。林内雨+樹幹流にふくまれる養分量は、収入量と植物体から溶脱された養分量と直接植物体の地上部に吸収された量の合計である。この三者の量の比は、測定できていない。溪流にふくまれる養分量は、森林生態系にとって支出である。

林外雨にふくまれる養分量は、広葉樹林の林床に到達したときには、リンのみは半分に減少したが、他は1.5倍からカリウムの約12倍にまで増加する。しかし、土壌層をとるあいだに減少して、渓流水となったときには、減少率のもっともひくいリンでさえ、林床に到達した養分量の55%にすぎなくなり、アンモニア態チッ素のばあいには、5%にすぎない。

収入と支出、すなわち林外雨と溪流にふくまれる養分量を比較すると、マグネシウムは約180%で支出のほうがおおきいが、他はカリウム85%、カルシウム57%、リン26%、硝酸態チッ素18%、アンモニア態チッ素8%と、収入のほうがおおきい結果がでた。

すなわち、マグネシウム以外は、森林生態系に蓄積されていることになる。

1962年5月から翌年4月までの林外雨量は1,462.6mmで上賀茂試験地の年平均降水量1,666.2mmにくらべると、ややすくない。さきにのべたように、溪流の養分濃度はほぼ一定で、養分量はおもに溪流の流量に支配される傾向があり、カリウム、カルシウム、マグネシウムについては、渓流水のほうが林外雨より濃度がたかいから、林外雨量のおおきい、すなわち流出量のおおきい年には、これらも支出のほうがおおきくなる可能性がある。

フィンランド全土について、水溶性のチッ素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムの収支をもとめた Viro [1953]、北米西海岸北西部の36年生のダグラス・ファーの人工林で、養分収支をもとめた Cole ら [1967] によれば、チッ素だけは収入がおおきく、他の元素は支出がおおきい。北米の水源地で、カリウム、カルシウム、マグネシウム、ナトリウムについて収支計算をおこなった Likens ら [1967] は、カリウムの収入がおおきく、他はやや支出がおおきいと報告している。

水溶性養分物質の収支は、土壌・植生・降水・母岩などの性質により、いろいろとなるようである。しかし、大面積皆伐などにより、表層土の異常な流出がおこらなければ、養分の流出はそれほどおおきくなく、森林生態系における水溶性養分の収支はわりあい安定しており、とくにチッ素・リンは、蓄積される傾向にあるといえるだろう。

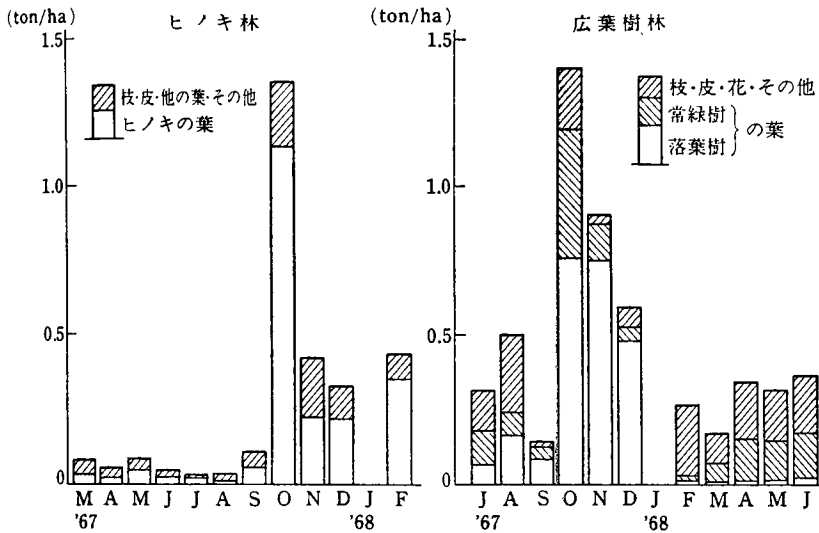


図18 リター量の季節変化。

リターにふくまれる養分物質の濃度・量

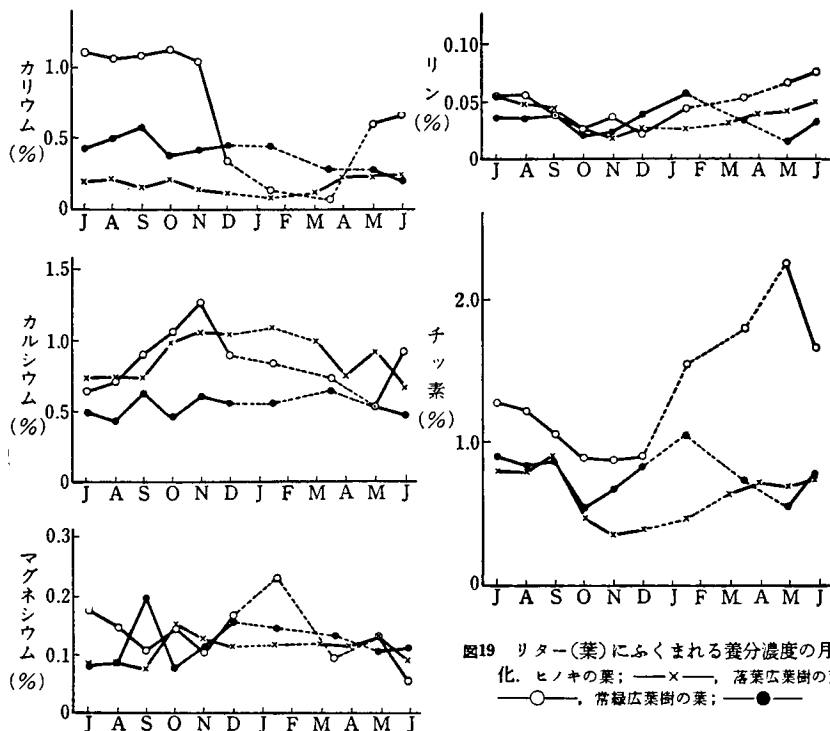
雨水とともにうごく養分量が、森林生態系での物質循環においてしめる位置をみるためには、雨水とは直接関係のない経路の循環量も調査する必要がある。

植物体の根から吸収された養分物質は、植物体を形成し、その一部は雨水に溶脱されて土壤に還元されるが、他の経路として、リター（落葉落枝）として土壤に還元され、そこで分解されて、ふたたび植物に吸収されるものがあり、従来、これが森林生態系内物質循環の主たる還元の経路であるとみなされてきている。

ヒノキ林については、1967年3月から翌年2月まで、広葉樹林は1967年7月から翌年6月まで、リター・トラップにおいてリター量とそれにふくまれる養分量を調査した。

リター・トラップは1m×1mの正方形の枠にカンレイ紗をはったもので、リターが地表面につかないよう高さ50cmに設置した。これをヒノキ林に8コ、広葉樹林に5コずつつけた。

リターは、月2～3回採取し、ひと月分をまとめて計量・分析した。ただし、1968年1・2月分と3・4月分はまとめて採取した。



リターは、つぎのように分類した。ヒノキ林では、1) ヒノキの葉、2) 枝と樹皮、3) ほかの木の葉（アカマツ、タカノツメなど）、4) その他（花、虫のフンなど）の4種類。広葉樹林では、1) 常緑広葉樹の葉、2) 落葉広葉樹の葉、3) 両方の枝と樹皮、4) その他（花、虫のフンなど）の4種類である。

リターの分布は正規分布であるとし、許容限界率約20%、信頼度約95%で、測定期間終了後に必要な枠数をもとめたところ、ヒノキ林で3コ、広葉樹林で2コであった。

リター量の内訳ならびに月変化を図18に示す。リターの大部分をしめるのは、ヒノキ林でも広葉樹林でも葉である。1年間通算、前者で72%、後者で74%を葉がしめている。季節的には、10・11・12月が圧倒的におおい。1968年10月30日の台風により、10月分のリターが急増した。もし、この台風がなければ、11月の落葉量が最高となったであろう。

リターの分析は、全チッ素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムについておこなった。全チッ素はケールダール法でおこない、他の元素については、硝酸—硫酸で湿式灰化したものを雨水とおなじ方法で分析した。

リター量だけでなく、養分濃度も葉がたかいので、養分量をリター量で除した各月の平均養分濃度の変化も、ほぼ葉の濃度の変化にしたがう。それゆえ、濃度の月変化を、落葉広葉樹、常緑広葉樹、ヒノキのそれぞれの落葉の濃度について考察する。季節的な変化をみるため、ヒノキ林と広葉樹林の3・4・5・6月は測定年度がことなるけれども、同じ年度として比較した。なお、ヒノキ林・広葉樹林の1・2月と広葉樹林の3・4月は、まとめて分析している[図9]。

一般的に葉齢の若い葉、すなわち緑葉がリターにまじると、濃度がたかくなるといえるだろう。斉藤[1970]が滋賀県で測定した、ヒノキのリターにまじったヒノキ緑葉の比率は4月10.7%、5月21.9%、6月30.7%、7月35.1%、8月32.6%、9月29.6%であり、この変化は上賀茂ヒノキ林でのチッ素、リン、カリウムの濃度変化のかたちとよく一致する。

また溶脱の難易にかかわる、葉の性質、元素の性質もリターの養分濃度に関係するだろう。厚いクチクラ層におおわれたヒノキ、ソヨゴなどの常緑樹の葉にくらべ、リュウブ、クリなどの葉が溶脱をうけやすいことは、とくにカリウム、チッ素などのばあい、落葉広葉樹のリターの濃度変化が常緑樹のそれにくらべて、おおきいことにあらわれている。アカマツ落葉の分解にともなう養分元素の溶脱をしらべた片桐ら[1970]によれば、溶脱しやすい元素の順は、ナトリウム、カリウム、マグネシウム、リン、チッ素であったという。このことは、落葉広葉樹のリターの濃度が、カリウムのばあい12月から翌年4月にかけて減少するのに、チッ素・リンのばあいは、逆に増加するという現象とよく対応している。

図20は、広葉樹林とヒノキ林のリターにふくまれる養分量の月変化を図示したものである。養分濃度変化の図とおなじように、広葉樹林・ヒノキ林の測定年度は一部ことなる。1月2月と広葉樹林の3月4月はまとめて採取分析した。ここではかりに2カ月分を等分して図示し、点線でつないでいる。

リターにふくまれる養分量の月変化は、ほとんど、リター量の変化とおなじ傾向をしめす。とくにヒノキ林に、その傾向がいちじるしい。リター量のもつ

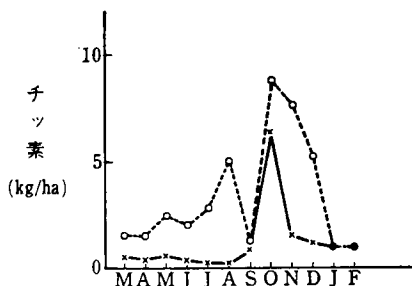
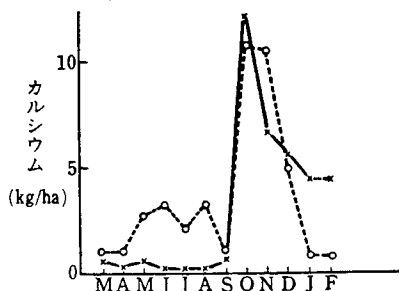
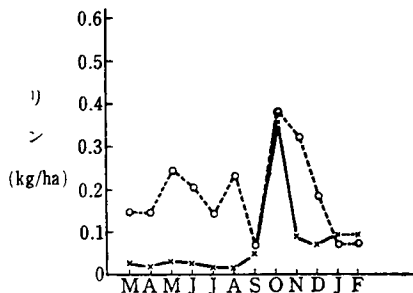
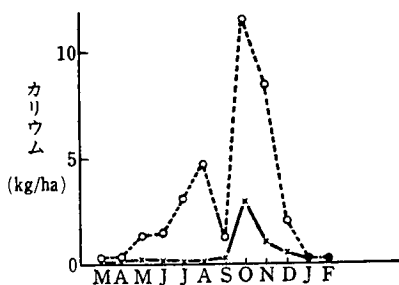


図20 リターにふくまれる養分量の月変化
広葉樹林；……○……，ヒノキ林——×——

とも多い10月に、広葉樹林・ヒノキ林の各養分元素とも最高値をしめすが、広葉樹林における11・12月の養

分量の減少のしかたは、養分元素の溶脱にかんする性質を反映している。もっとも溶脱を受けやすいカリウムは、11月12月と急激に減少し、落葉樹が紅葉してからは、たちまち溶脱されてしまうことをしめしているが、チッ素・リンはむしろ相対的に養分濃度が増加する傾向にあることを反映している。5月6月にあらわれるリンのおおきい養分量は、濃度のたかい生葉の影響と、花にふくまれる部分〔表7〕がそうとうきいていとおもわれる。

1年間のリターにふくまれる養分量を、測定年度はことなるけれども、表3の雨水に溶けて林床に到達する養分量（林内雨・樹幹流）と比較すると〔表8〕、カリウム、マグネシウムにかんしては、雨水にふくまれるほうがおおきく、倍ちかいものからおなじぐらいまで。カルシウムはリターの半分ぐらい。リンは、リターの0.5割から2割ていど。チッ素は雨水のばあい、硝酸態とアンモニア

表 7 年間リターにふくまれる養分量

kg/ha・year

		有 機 物	N	P	K	Ca	Mg
広葉樹林 '67 Jul. '68 Jun.	落葉樹の葉	2,360.3 46.0%	22.21 55.2%	0.75 40.5%	21.55 62.2%	24.29 84.5%	3.16 79.4%
	常緑樹の葉	1,450.8 28.3	7.25 18.0	0.33 17.7	6.18 17.9	10.16 4.5	1.43 2.6
	枝・皮	281.0 5.5	1.47 3.6	0.06 3.5	0.28 0.8	1.24 10.5	0.14 17.3
	花・他	1,042.7 20.3	9.28 23.1	0.70 38.0	6.62 19.1	5.89 0.5	1.20 0.7
	合 計	5,134.8 100	40.21 100	1.84 100	34.63 100	41.58 100	5.93 100
ヒノキ林 '67 Mar. '68 Feb.	葉	2,155.67 72.4%	10.34 72.3%	0.57 64.5%	3.68 64.7%	29.76 84.5%	2.87 79.4%
	枝と樹皮	224.39 7.5	0.92 6.5	0.12 13.8	0.14 2.5	1.60 4.5	0.09 2.6
	他の葉	566.68 19.0	2.86 20.0	0.19 20.9	1.78 31.2	3.69 10.5	0.63 17.3
	その他	32.24 1.1	0.17 1.2	0.01 0.8	0.09 1.6	0.16 0.5	0.03 0.7
	合 計	2,978.98 100	14.29 100	0.89 100	5.69 100	35.21 100	3.62 100

態チッ素だけの合計であるが、それでもリターの2割から5割ほどにそうとうする。ヒノキ林の雨水にふくまれる養分量は、広葉樹林にくらべてちいさいが、リターにふくまれる量もちいさいので、ヒノキ林では雨水にふくまれる養分量のしめる割合は、広葉樹林におけるよりもむしろおおきい。

カンレンボクの林分、英国の Sessile Oak 林、ガーナの熱帯降雨林などと比較したばあい、一定の傾向はみられない。カンレンボク林分のばあい、林内雨の養分量のしめる割合はちいさく、Sessile Oak 林では上賀茂広葉樹林と同程度の林内雨養分量であるが、そのリターに対する比率は、上賀茂にくらべ、チッ素を除いてはるかにおおきい。熱帯降雨林のばあい、林内雨のカリウムはリターの3.5倍、リンも5割以上になるが、チッ素は1割にみたない。このような相違がなにによるかあきらかでない。葉からの溶脱の難易だけではなく、落葉前の非同化部分への転流の度合も関係しているのではなからうか。

表 8 リターと林内雨にふくまれる養分量の比較

			N	P	K	Ca	Mg	
上賀茂ヒノキ林	林内雨+樹幹流	A	7.9-7.0	0.04-0.14	11.3-14.7	16.0-18.3	3.5-4.6	kg/ha・year
		B	14.3	0.89	5.7	35.2	3.6	"
		A/B×100	49-55	5-16	198-258	44-52	97-130	%
上賀茂広葉樹林	林内雨+樹幹流	A	8.5-7.4	0.22-0.48	32.6-48.4	15.8-17.7	6.1-4.8	
		B	40.2	1.84	32.6	41.6	5.9	
		A/B×100	21-18	12-26	94-140	38-43	103-81	
京都 カンレンボク (3年生)	林内雨	A	4.9	1.5	27.5	25.3	1.0	
		B	64.9	11.1	79.9	74.5	53.2	
		A/B×100	8	14	34	34	2	
英国 Sessile-Oak	林内雨	A	8.82	1.31	28.17	17.18	9.36	
		B	41.06	2.19	10.51	23.83	3.87	
		A/B×100	21	60	268	72	242	
ガーナ 熱帯降雨林	林内雨	A	16.1	4.1	238.6	41.8	29.4	
		B	201	7.3	69	208	45	
		A/B×100	8	56	346	20	65	

森林の養分現存量と生長量

雨水にふくまれる養分物質が、森林生態系の物質循環においてしめる位置をおさえ、あわせて物質循環の動態を把握するため、1968年8月、広葉樹林とヒノキ林の樹幹流を測定した $5 \times 5 \text{ m}^2$ のプロットにふくまれる樹木すべてを伐倒・抜根し、現存量と生長量をもとめた。また、そのプロットの A_0 層と 70cm までの土壌を採取し、養分物質量を測定した。

ヒノキ林ではヒノキ 6 本を伐倒・抜根した。平均胸高直径 (\bar{D}) 10.8cm, 平均樹高 (\bar{H}) 9.7cm であった。広葉樹林では、ソヨゴ 11 本, リョウブ 2 本, ツバキ 1 本の計 14 本で、 \bar{D} : 6.5cm, \bar{H} : 6.8cm であった。

伐倒・抜根した各個体木について、それぞれ幹 (W_s)、枝 (W_b)、葉 (W_L)、根 (W_R) の幹物重をもとめた。落葉樹のリョウブいがいについては、新葉 (W_{LN}) と旧葉 (W_{Lo}) にわけて測定した。これらを合計して、ヘクタールあたりの幹 (y_s)、枝 (y_b)、葉 (y_L)、根 (y_R) の重量を算出した。

1 年間の各部分の生長量をもとめるため、各個体木の樹幹析解をおこない、幹の体積 (V_s)、樹皮のついていない幹の体積 (V'_s)、最近 5 年間の幹材積生

表 9 現存量および生長量の推定式

	ヒノキ林	広葉樹林
$V_s - D^2H$	$\log V_s = 0.9289 \log D^2H - 1.1335$	$\log V_s = 0.9199 \log D^2H - 1.1742$
$W_s - D^2H$	$\log W_s = 0.8993 \log D^2H - 1.3362$	$\log W_s = 0.9240 \log D^2H - 1.3570$
$W_B - D^2H$	$\log W_B = 1.1869 \log D^2H - 3.1243$	$\log W_B = 1.5004 \log D^2H - 3.3564$
$W_L - D^2H$	$\log W_L = 0.9676 \log D^2H - 2.5057$	$1/W_L = 30,315.95/D^2H^{1.88} + 0.25$
$V_s - W_s$	$\log V_s = 1.0112 \log W_s + 0.2676$	$\log V_s = \log W_s + 0.1761$
$W_B - W_s$	$\log W_B = 1.3198 \log W_s - 1.3608$	$\log W_B = 1.6311 \log W_s - 1.1540$
$W_L - W_s$	$\log W_L = 1.0533 \log W_s - 1.0463$	$1/W_L = 58.525/W_s^2 + 0.25$
$W_R - W_s$	$\log W_R = 1.3011 \log W_s - 0.9587$	$\log W_R = 0.7781 \log W_s + 0.0670$
$\Delta W_s - W_s$	$\Delta W_s = 0.0520 W_s$	$\Delta W_s = 0.118 W_s$
$\Delta W_L - W_L$	$\Delta W_L = 0.0548 W_L$	$\Delta W_L = -0.059 W_L(W_L - 4)$
$\Delta W_B - W_B$	$\Delta W_B = 0.0686 W_B$	$\Delta W_B = 0.192 W_B$
$\Delta W_R - W_R$	$\Delta W_R = 0.0676 W_R$	$\Delta W_R = 0.0856 W_R$

長量 (ΔV_s) をもとめた。ついで、 D^2H, W_s, W_B, W_L, W_R のおたがいの関係を、単純相対生長式： $\log y = h \log x + \log \alpha$ (x, y : 生長系の2部分, h, α : 定数) かあるいは、小川ら [1965 a, 1965 b] による拡張相対生長式： $\frac{1}{y} = \frac{1}{\alpha x^h} + \frac{1}{Y}$ ($Y \equiv y$) $_{x \rightarrow \infty}$ にあてはめてもとめた [表 9]。

各個体木の最近5年間の幹材積生長より、生長が指数関数的であるとして、それから最近1年間の材積生長量 (ΔV_s) を計算した。すなわち、 $\Delta V_s = V'_s (1 - e^{-1})$ において、 $\Delta V_s/V'_s$ を V'_s にたいしてプロットすると、傾向的な動きはしめさず、ほぼ一定とみなせる。

ΔV_s を個体木あたりの幹重生長量 (ΔW_s) に換算し、 $\Delta W_s \sim W_s$ の関係式をもとめた。

他の部分の生長量は、個体木の幹重と各部分重とのあいだの相対生長式を幹重について微分し、例をヒノキ林の枝の生長に (ΔW_B) にとれば、

$$\log W_B = 1.3198 \log W_s - 1.3608$$

を幹重について微分して、

$$\frac{1}{W_B} \cdot \frac{dW_B}{dW_s} = 1.3198 \frac{1}{W_s}.$$

$$\frac{dW_B}{dW_s} = \frac{\Delta W_B}{\Delta W_s} \quad \text{とすると、}$$

表10 植物体の養分現存量と生長部分の養分量

		有機物量 ton/ha	N kg/ha	P kg/ha	K kg/ha	Ca kg/ha	Mg kg/ha
広 葉 樹 林	Y_S	59.6	72.3	4.78	65.9	146.1	52.6
	Y_B	23.1	80.6	5.75	59.2	78.1	19.7
	Y_L	5.7	77.2	3.55	53.9	37.9	15.3
	Y_{LN}	3.1	45.6	2.04	37.4	19.8	9.7
	Y_{LO}	2.6	31.6	1.51	16.5	18.1	5.6
	Y_R	38.1	82.3	4.52	71.4	81.4	33.5
	Y	126.5	312.4	18.60	250.4	343.5	121.2
	ΔY_S	7.5	9.0	0.60	8.3	18.3	6.6
	ΔY_B	5.0	17.6	1.25	12.9	17.0	4.3
	ΔY_L	0.8	10.2	0.47	7.1	5.0	2.0
	ΔY_R	3.1	6.7	0.37	5.8	6.6	2.7
	ΔY	16.4	43.5	2.69	34.1	46.9	15.6
	A ₀ 層	15.0	287.1	10.25	19.4	78.8	26.1
	土壌(0~70cm)		3,701.0	531.2	5,779.0	258.0	3,842.2
	計		3,988.1	541.45	5,798.4	336.8	3,868.3
ヒ ノ キ 林	Y_S	84.7	87.2	5.42	49.1	134.7	29.6
	Y_B	13.5	40.1	2.58	17.4	62.4	6.2
	Y_L	10.0	107.3	6.05	40.7	99.6	18.1
	Y_{LN}	2.0	21.8	1.52	11.1	19.0	3.4
	Y_{LO}	8.0	76.4	4.53	29.6	80.6	14.7
	Y_R	30.1	45.5	2.30	17.3	49.7	10.2
	Y	138.3	280.1	16.35	124.5	346.4	64.1
	ΔY_S	4.2	4.3	0.27	2.4	6.6	1.5
	ΔY_B	0.9	2.6	0.17	1.1	4.0	0.4
	ΔY_L	0.5	5.2	0.32	2.2	5.3	1.0
	ΔY_R	2.0	3.0	0.15	1.2	3.3	0.7
	ΔY	7.6	15.1	0.91	6.9	19.2	3.6
	A ₀ 層	12.3	112.9	5.14	11.8	37.0	5.8
	土壌(0~70cm)		2,143.1	299.7	2,639.5	193.7	2,164.9
	計		2,256.0	304.84	2,651.3	230.7	2,170.7

$\Delta W_B = 1.398 \frac{\Delta W_B - W_B}{W_S}$ となり、これに $\Delta W_S \sim W_S$ の関係式を代入して、

$$\Delta W_B = 0.0686 W_B$$

をえる。このようにして、 $\Delta W_L \sim W_L$, $\Delta W_R \sim W_R$ の関係式をもとめた〔表9〕。

これらによる数値を合計して、ヘクタールあたりの各部分と全体の生長量を

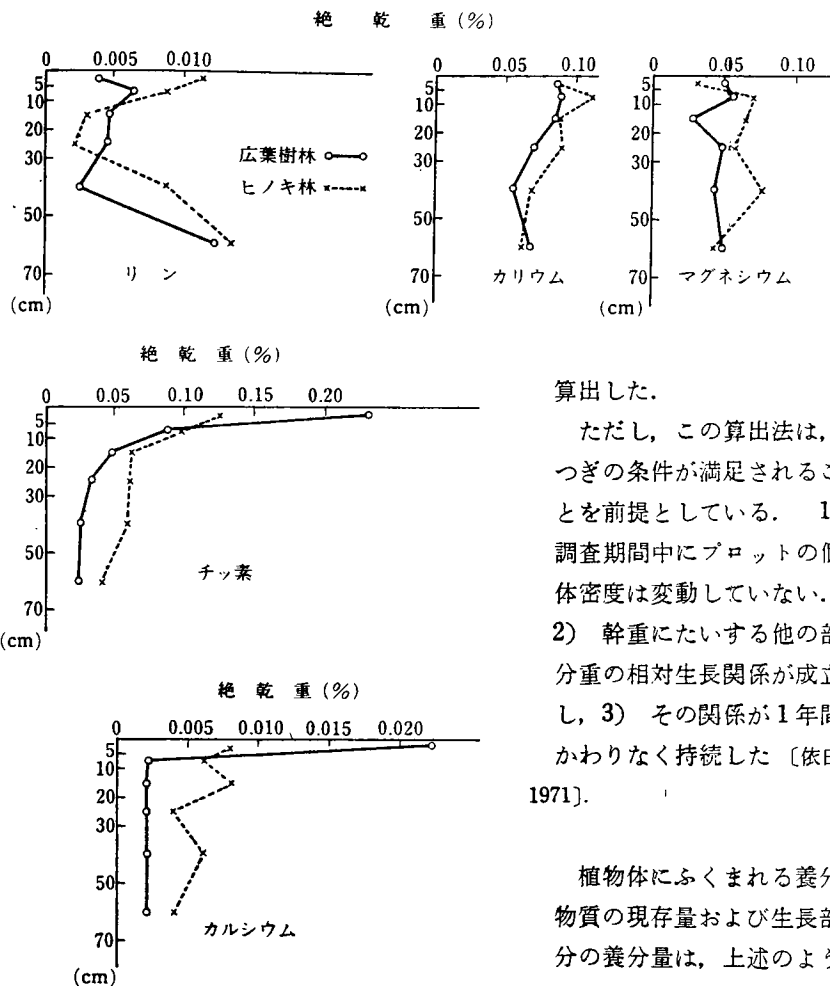


図21 土壌養分濃度の垂直変化。 絶対乾重%
広葉樹林：——○——、ヒノキ林：……×……。

じて算出した。分析したものは、幹・枝・新葉・旧葉・根である。これをヒノキ、ソヨゴ、ツバキ、リュウブについておこなった〔表10〕。

有機物の現存量は、ヒノキ林のほうがおおきいが、養分現存量は広葉樹林がおおきく、生長量は広葉樹林のほうがおおきいので、それにふくまれる養分量はヒノキ林のそれにくらべ、そうとうおおきい。養分物質の循環の面からみると、広葉樹林のほうが、動きが活発であるといえよう。

算出した。

ただし、この算出法は、つぎの条件が満足されることを前提としている。 1) 調査期間中にプロットの個体密度は変動していない。 2) 幹重にたいする他の部分重の相対生長関係が成立し、 3) その関係が1年間かわりなく持続した〔依田1971〕。

植物体にふくまれる養分物質の現存量および生長部分の養分量は、上述のようにしてえられた有機物量に、分析してえた養分濃度を乗

A₀層は、1×1m²のプロットを数カ所とり、有機物の平均重量をもとめた。これに養分濃度を乗じて平均養分量を算出した〔表10〕。

ヒノキ林・広葉樹林で、それぞれ4カ所ずつ深さ70cmまで、0～5、5～10、10～20、20～30、30～50、50～70cmの各層の土壌を採取し、風乾試料について熱濃塩酸可溶物を抽出して、土壌にふくまれる養分物質質量をもとめた。土壌中の養分物質の垂直的配分のもようを図21にしめす。チッ素は表層部分に集積される性質であることを明瞭にしめている。他の元素には、明瞭な傾向はみとめられない。カルシウム量がきわめてちいさく、広葉樹林・ヒノキ林とも植物体にふくまれる部分のほうが、土壌にあるものよりおおきい。

森林生態系での養分物質の循環

いままでにのべた、養分物質の循環にかかわる各項目をまとめたものが表11であり、模式図化したものが図22である。

森林生態系の養分物質の収入と支出は、裸地の降水にふくまれる養分量と、溪流にふくまれる養分量である。ヒノキ林には、流出量の測定がないが、広葉樹林の収支計算は、マグネシウムをのぞき、各養分元素についてプラスとなる。チッ素とリンは、収入量は支出量の数倍にたっている。さきにのべた、ステンレス・スティールのネットによるエアロゾルの吸着の実験では、チッ素はエアロゾルの付着によりかなり増加するから、収入量はさらにおおきい可能性がある。しかし、ここではバクテリアによるチッ素の収入、脱チツ現象による支出は測定されていない。

チッ素とリンがいい、すなわちカリウム、カルシウム、マグネシウムについては、この年度の調査では、マグネシウムをのぞいて収入が大となったが、おおよそ収支はつりあっていると考えてよいのではなかろうか。エアロゾル吸着実験の結果のように、これら養分元素については、林外雨水の約2倍に養分量が増加しているとすれば、そのぶんが生態系にとっての増加量となっているのであろう。ここでは、土壌の母岩・母材料の風化による収入量は測定されていないが、林外降水と流出水にふくまれる養分量の収支が増加またはついありをたもっている以上、自然状態での森林生態系の養分収支は、増加またはついありをたもつ傾向をたもっているものといえるだろう。

森林生態系全体の養分量にかんする収支決算は、おおむね安定しているよう

表11 1年間の養分の循環量

			N	P	K	Ca	Mg	測定期間
広 葉 樹 林	収入量: 裸地の降水 A	1,462.6mm	5.5	0.5	2.7	8.8	1.3	1962, 5—63, 4
	林内雨+樹幹流 B		8.5	0.2	32.6	15.8	6.1	
	リター C	5.1 ton	40.2	1.8	34.6	41.6	5.9	1967, 7—68, 6
	植物体現存量 D	126.1 ton	312.4	18.6	250.4	343.5	121.1	1968, 7
	土壌中現存量 (A_0 をふくむ) E		3,988.1	541.5	5,798.4	336.8	3,868.3	"
	年生長量 F	16.3 ton	43.5	2.7	34.1	46.9	15.6	
	吸収量 $B+C+F-A$		86.7	4.2	98.6	95.5	26.3	
	流出量: 溪流流出水 G	749.5mm	0.6	0.1	2.3	5.0	2.3	1962, 5—63, 4
ヒ ノ キ 林	収入量: 裸地の降水 A'	1,462.6mm	5.5	0.5	2.7	8.8	1.3	1962, 5—63, 4
	林内雨+樹幹流 B'		7.9	0.0	11.2	16.0	3.5	
	リター C'	3.0 ton	14.3	0.9	5.7	35.2	3.6	1967, 3—68, 2
	植物体現存量 D'	138.3 ton	280.1	16.4	124.5	346.4	64.1	1968, 7
	土壌中現存量 (A_0 をふくむ) E'		2,256.0	302.8	2,651.3	230.7	2,170.7	"
	年生長量 F'	7.8 ton	15.2	0.9	6.9	19.3	3.5	
	吸収量 $B'+C'+F'-A'$		31.9	1.3	21.2	61.7	9.3	
	流出量: G'	?	?	?	?	?	?	?

A, B, C, F, G は kg/ah・yr, D, E は kg/ha でしめす。

であるが、生態系内部での物質循環の量・速度 [kg/ha・year] は、いろいろの経路をとって、収支にかんする量よりはるかにおおきい。きわめておおざっぱないいかたをすれば、還元量・吸収量は収支量より1桁おおきく、植物体現存量は2桁おおきく、 A_0 層土壌中の現存量は3桁おおきいといえるだろう。

生態系内部の物質循環を土壌を中心にして考えてみる。土壌は、表11、図22にみられるように、多量の養分の貯蔵タンクであり、そこから養分を吸収して、植物体が成立しているといえる。土壌への養分の流入は、風化による収入は無視するとして、リター・フォールと雨水にふくまれる養分量である。リター・フォールは、便宜的に枯死して落下しない部分の実験期間の増加はないと仮定し、リター・フォールすなわち枯死量と考える。一般に還元量とは、植物体から土壌に還元される量であり、土壌にとっての収入とされるが、雨水を考慮するばあいはいささか異なる。雨水による植物体からの溶脱分は還元量であるが、土壌にとっての収入は林内雨・樹幹流にふくまれるすべての養分量であり、溶脱量だけではない。土壌への収入量のうち、雨水にふくまれる部分が、とくにカリウム、マグネシウムのばあい、たかい比率をしめることは、すでにリターの章でのべた。

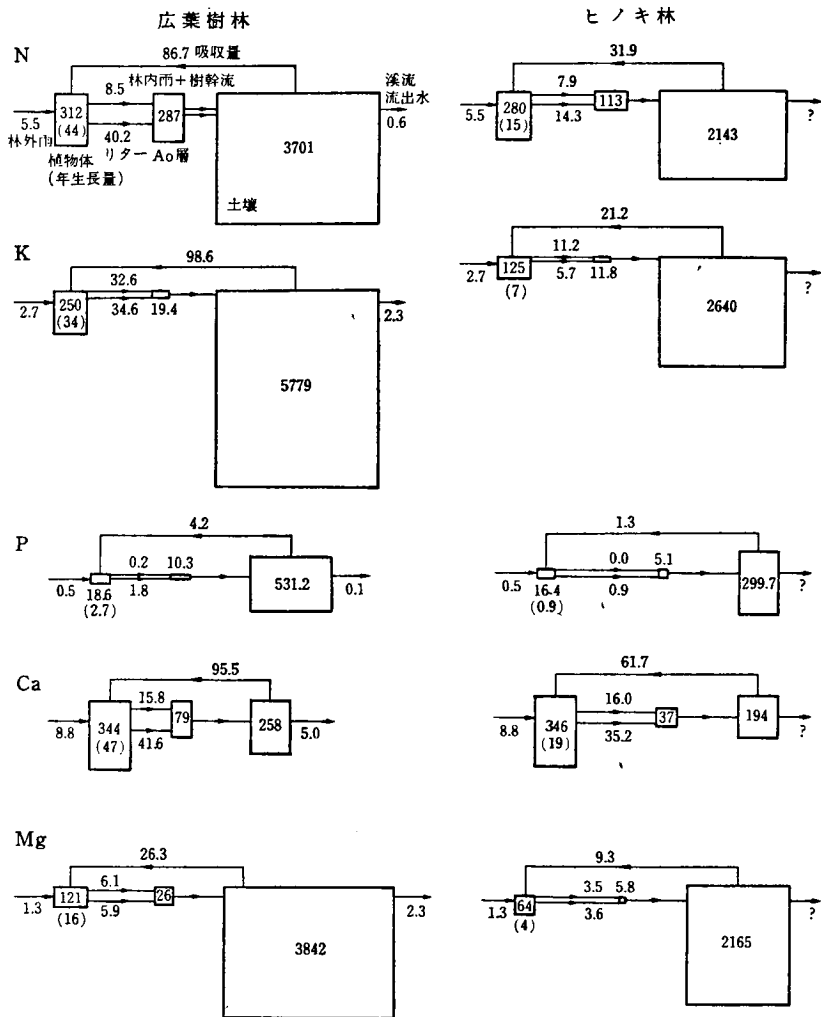


図22 森林生態系での養分物質の循環

土壌にとっての支出は、植物に吸収される部分と系外に流出する部分である。吸収量は、植物体の生長につかわれた部分と、枯死した部分と植物体から溶脱された部分の養分量の和である。林内雨・樹幹流の養分量と林外雨の養分量の差は、溶脱分とエアロゾル吸着分をふくんでいるが、その区分はできないので、それを溶脱分とかりにしている。このばあい、吸収量がエアロゾル吸着量だけ過大評価されることになる。

極盛状態にある理想的に安定した森林では、土壌への収支はつりあうとされているが、生長をつづけている森林では、とうぜん吸収量、すなわち土壌にのっての支出が還元量よりおおきい。土壌は生長に要する養分量と雨水にかんする収支分を補給しなければならない。これを、本実験の広葉樹林についてみると、チッ素： $43.5 - (5.5 - 0.6) = 38.6 \text{ kg/ha} \cdot \text{year}$ となり、同様にリン：2.3, カリウム：33.7, カルシウム：43.1, マグネシウム：16.6 $\text{kg/ha} \cdot \text{year}$ となる。いまかりに、風化による収入が無視しうるほど小さいとすれば、上記の数値で土壌中の養分量の数値をわれば、現在の状態で生長がつづくばあい、何年分の養分量を土壌（A₀層をふむく）が保持しているかがわかる。チッ素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムの順に、それぞれ103年、235年、172年、8年、233年となる。もっともすくないものが制限要因となるから、カルシウムの不足によって、現在の状態は8年間しかつづけられない。それまでに年生長量は零となって、森林は安定しなければならないことになる。このばあいのカルシウム量は、熱濃塩酸抽出による分析であり、この量が必要に応じて可給態化するものと仮定しているが、そうならなければ、カルシウムが制限要因となる年数は、さらに短縮されることになる。

養分のタンクとして土壌のおおきさをみるため、いくつかの仮定のもとに推定をこころみてみよう。広葉樹林・ヒノキ林とも安定した、生長量零の森林であり、かつ養分物質の動きは、外部との収支はつりあって、閉鎖系とおなじであると仮定する。そうすると、リターと雨水に溶脱された部分に相当する養分量が、土壌というタンクから毎年出入していることになる。その量と土壌中の養分量を比較することで、回転率をもとめられる。チッ素、リン、カリウム、カルシウム、マグネシウムの順に、広葉樹林では、1.1, 0.3, 1.1, 14.4, 0.3%, ヒノキ林では、0.7, 0.5, 0.5, 18.4, 0.3%となり、やはりカルシウムの回転率が圧倒的にたかい。

回転率の逆数を取り、タンクの内容が入れかわるのに要する年数を算出すると、上記の養分元素の順に、広葉樹林で92, 300, 90, 7, 280年、ヒノキ林で135, 220, 190, 5, 370年となり、他の元素については、森林植物の一世代の年数をこえるゆっくりした、余裕のある回転が土壌を中心におこなわれているが、カルシウムについては緊迫した状態にある。

おなじ条件のもとで、植物体を中心として、養分物質の一回転に要する年数を算出すると、上記の養分元素の順に、広葉樹林では、7, 12, 4, 7, 11年。

ヒノキ林では、17, 41, 9, 8, 11年となる。広葉樹林でのカリウムの回転がそうとう速い。これは広葉樹林での葉からのカリウムの溶脱が、おおきく寄与していることをしめしている。他の養分元素については、ヒノキ林のリンをのぞいて、およそ7~15年ぐらいのあいだにあり、カルシウムもそのあいだにある。カリウムは、回転率はたかくとも、土壌には充分な量がふくまれている。しかし、カルシウムは、土壌にふくまれている量はすくなく、かつ植物体内での回転率は他の元素とあまりかわらない。すなわち、土壌のなかのカルシウム量の緊迫した状態に対応した吸収・還元を植物が積極的におこなっているとはいえない状態にある。

したがって、伐採や A_0 層の採取などによって、もっとも敏感に影響をうけるのはカルシウム量であり、それがこの森林生態系での物質循環の制限要因であるといえるだろう。

年単位の数値を基礎に、養分物質の循環について考察してきたが、現実には物質循環の速度は季節性をもっている。河原ら [1968] の苗畑でのカンレンボクによる実験では植物による養分物質の吸収は、4月から9月にかけておこなわれ、7月がもっともさかんで、9月以降はほとんど休止してしまう。一方、土壌にとっての収入すなわち還元量は、リターによるものはほとんど10・11月の落葉期に集中する。雨水によるものは、カリウムは落葉期におおきなピークをもっているが、他はおおむね雨量のおおきい月におおきい量をしめす。そしておおきい雨量の月は、特定できない。したがって、土壌は収入と支出の時期のずれを、おおきな養分タンクとしてカバーし、森林植物に安定した養分の供給をつづける役目をしている。

以上、現在測定可能な項目について、上賀茂試験地のヒノキ林・広葉樹林におけるデータをもとめ、森林生態系での物質循環の動態を追及した。

文 献

ÅNGSTRÖM, A., and L. HÖGBERG, 1952 On the content of Nitrogen ($\text{NH}_4\text{-N}$ and $\text{NO}_3\text{-N}$) in atomospheric precipitation, *Tellus* 4: 31-42.

有光一登, 松井光瑠 1964 「簡易なテンションライシメーターによる土壌水分の動的研究(I)」『日林誌』46: 208~213.

CARLISLE, A., A. H. F., BROWN and E. J. WHITE 1966 The organic matter

- and nutrient elements in the precipitation beneath a sessile oak (*Quercus petraea*) canopy, *J. Ecol.*, 54: 87-98.
- COLE, D. W., S. P. GESSEL and S. F. DICE 1967 Distribution and cycling of nitrogen, phosphorus and calcium in a second growth Douglas-Fir ecosystem, *Symp. Prim. Prod. Mineral Cycling in Natural Ecosystem, 13th Meet.*, 197-232.
- 富士岡義一・手島三二 1962 「傾斜地の流出機構に関する基礎的研究(IV)」『農土木研』別冊 4: 19~23.
- INGHAM, G., 1950 The mineral content of air and rain and importance to agriculture, *J. Agri. Sci.* 40: 55-61.
- 稲川悟一, 伊藤悦夫, 金田次弘 1965 「地表植物の有無及び種類が土壤中の肥料成分の流亡に及ぼす影響——簡易ライフメーターによる試験」『静大農研報』15: 87-105.
- 岩坪五郎・堤利夫 1967 「森林内外の降水中の養分量について(II)」『京大演報』39: 110~124.
- 岩坪五郎・西村武二・堤利夫 1968 「森林内外の降水にふくまれる養分量について(IX)」79 『日林誌』: 274~6.
- 岩坪五郎・堤利夫 1968 「森林内外の降水にふくまれる養分量について(III)」『京大演報』40: 140~156.
- 片桐成夫・千葉喬三・堤利夫 1970 「落葉落枝の分解にともなう養分量の変化」『京大演報』41: 106~115.
- 河原輝彦・岩坪五郎・西村武二・堤利夫 1968 「カンレンボク模型林分における物質の動き」『日林誌』50: 125~134.
- KITTREDGE, J. 1948 *Forest influences*, Mc. Graw Hill, Newyork.
- LEONARD, R. E. 1961 Interception of precipitation by northern hardwoods, *Station paper No. 159, Northeastern Forest Exp. Station.*
- LIKENS, G. E., F. H. BORMANN, N. M. JHONSON and R. S. PIERCE 1967 The calcium, magnesium, potassium, and sodium budgets for a small forested ecosystem, *Ecol.*, 48: 772-785.
- MADGWICK, H. A. I. & J. D. OVINGTON 1959 The chemical composition of precipitation in adjacent forest and open plot, *Forestry*, 32: 14-22.
- 丸山明雄・岩坪五郎・堤利夫 1965 「森林内外の降水中の養分量について(I)」『京大演報』36: 25~39.
- MECKLENBURG, R. A. & H. B. TUKEY, Jr. 1964 Influence of foliar leaching on root uptake and translocation of Calcium-45 to the stems and foliage of *Pachilus vulgaris*, *Pl. Phys.*, 39: 533-535.
- 三宅泰雄 1955 『降水の化学』地人書館, 東京.
- Nye, P. H. 1961 Organic matter and nutrient cycles under moist tropical forest, *Plant and Soil*, 13: 333-346.

- OGAWA, H., K. YODA, K. OGINO, T. SHIDEI, D. RATANAWONGSE and C. APASUTAYA 1965-a Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand I. Structure and floristic composition. *Nature & Life in SE Asia*, 4: 13-48.
- OGAWA, H., K. YODA, K. OGINO and T. KIRA 1965-b Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand II. Plant biomass. *Nature & Life in SE Asia* 4: 49-80.
- 荻原貞夫 1967 「日雨量とその対応流出量」『水利科学』11, 2: 1~11.
- 斉藤秀樹・四手井綱英 1970 「ヒノキ林の落葉落枝量の空間分布 —リタートラップの大きさとその必要数について—」JIBP-PT-F, 中間報告: 23~34.
- 四手井綱英 1963 『アカマツ林の造成』(四手井綱英編) 地球出版, 東京.
- 正垣幸造・岩坪五郎・堤利夫 1965 「森林内外の降水中に含まれる養分量について (Ⅲ) —葉からの養分溶脱についての実験—」『日林誌』76: 110~112.
- STENLID, G. 1958 Salt losses and redistribution of salts in higher plants, *Encyclopedia of plant physiology*, 4: 615-637, Springer Verlag, Berlin.
- 武田繁俊 1950 『宝川森林治水試験第2回報告』前橋営林局, 前橋.
- THRONE, G. 1955 Nutrient uptake from leaf spray by crops, *Field Crops Abst.* 8, No. 3: 147-152.
- 戸田良吉 1953 「枝張りの程度のあらわし方—キリシマアカマツでしらべた一例—」『日林誌』35: 385~388.
- 堤 利夫 1963 「せき悪林地とその改良」『アカマツ林の造成』(四手井綱英編) 前出.
- VIRO, P. J. 1953 Loss of nutrients and the nutrient balance of the soil in Finland, *Comm. Inst. Forest. Fenn.*, 42: 1-50.
- VIRTANEN, A. I. 1952 Molecular nitrogen fixation and nitrogen cycle in nature, *Tellus*, 4: 304-306.
- 依田恭二 1971 『森林の生態学』築地書館, 東京.